

EVALUACIÓN DE LOS ASPECTOS HIDROLÓGICOS, GEOAMBIENTALES Y DE RIESGOS DEL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL Y PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DEL PROYECTO MINERO LOMA LARGA

CORPORACIÓN GEOAMBIENTAL TERRAE

Elaborado por:

Julio Fierro Morales. Geólogo MSc Geotecnia

Eduardo Quintero Chavarría. Ing. Civil MSc. Geofísica

Carlos Román Reina Leal. Ing. Civil MI - Geotecnia

Erika Cuida López. Geóloga MSc (a) Hidrogeología tropical

Lorena Barreto Gutiérrez. Ing. Civil. Esp. Hidráulica y MSc (a) Ecohidrología

Luisa Alvarado Reyes. Ing. Civil. Esp. Gestión del agua y MSc (a) Ecohidrología

Miguel Cáceres Gaitán. Geólogo

Jeremy León Linares. Geógrafo (a)

Julio de 2022



TABLA DE CONTENIDO





Transversal 15B No. 46 – 16 Of. 506 Tel: 340 24 62 Bogotá D.C., Colombia
info@terraegeoambiental.org



LISTADO DE FIGURAS


TERRAE





LISTADO DE TABLAS

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS



AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo agradecen a todas las personas que colaboraron con su desarrollo.

De manera particular queremos reiterar nuestro afecto y reconocimiento a las personas que nos guiaron y acompañaron a campo, particularmente a Mario y Pablo.

La presencia de Correntin "Coco" Langouët en el trabajo de campo nos animó y su sonrisa y disposición se agradecen.

En la logística, las explicaciones del contexto social y cultural y el impulso para saber los reales destinatarios del trabajo agradecemos a Graciela "Chelita" Calle y Koldo Etxarri de Savia Roja, y a Lizardo Zhagüi, presidente de la Junta Administradora de Agua Potable Tarqui Victoria del Portete.

A la asambleísta de Azuay Sofía Sánchez que compartió el estudio de impacto ambiental para que pudiera ser analizado.

Y un agradecimiento aparte a Kirsten Francescone y Viviana Herrera Vargas, de MiningWatch Canadá (Alerta minera Canadá) por su indeclinable confianza en nuestro trabajo.

Se lo dedicamos a los habitantes y defensores del territorio, particularmente a las mujeres que son las más cuidadoras…

Para la gente que sabe que el agua camina las montañas por fuera y por dentro.



RESUMEN SOBRE LA INVIABILIDAD DEL PROYECTO MINERO LOMA LARGA EN EL PÁRAMO DE QUIMSACOCHA

El proyecto minero Loma Larga, se trata de extraer fundamentalmente oro y cobre con técnicas de explotación subterránea en el páramo de Quimsacocha a lo largo de 16 años. La tasa de extracción es de 3000 toneladas por día lo que se constituye en más de 14 millones de toneladas a lo largo del proyecto. Parte de los residuos se dispondrán de nuevo en el subsuelo llenando las galerías y túneles, pero otra parte, 5,5 millones de toneladas de relaves, quedarán dispuestos en el territorio para siempre.

El área del proyecto minero Loma Larga se ubica en la parte más alta de la vertiente amazónica, casi en la divisoria de aguas con el Pacífico, con lo cual su potencial de contaminar aguas usadas para consumo humano y agropecuario es altísimo. De igual manera interseca, y afectaría, áreas especiales para la conservación de la biodiversidad como la Reserva de la Biósfera Macizo de las Cajas y el Área Nacional de recreación Quimsacocha, el páramo de Quimsacocha o 3 Lagunas, que está categorizado como un humedal de altura y hace parte de la Reserva de Biósfera Macizo del Cajas.

La minería de metálicos es una actividad que conlleva impactos para siempre en los territorios, que incluyen, entre otras, la modificación del ciclo de las aguas, su contaminación por liberación de químicos tóxicos, la modificación de los paisajes y el riesgo relacionado con la falla de las acumulaciones de desechos (relaves o colas).

Los páramos, por otra parte, son ecosistemas fundamentales en la regulación regional del ciclo del agua y son las zonas de recarga fundamental en los Andes, en un flujo de materia y energía global que involucra los polvos del Sahara, el océano Atlántico y la selva amazónica. Los páramos acumulan y regulan ese ciclo y permiten la infiltración a partir de la condensación de aguas meteóricas. La vegetación, los suelos, las rocas y las pendientes interactúan para constituir los nacimientos de las aguas superficiales y las zonas de infiltración y recarga de las subterráneas.

La interacción minería – páramo es de alta complejidad, pues no solamente se intervienen las coberturas vegetales y el suelo sino también en subsuelo, con ello los impactos son totales en el ecosistema-geosistema. La conformación de túneles y galerías afecta la interacción entre aguas superficiales y aguas subterráneas, tanto someras como profundas.

Las rocas que contienen metálicos como el oro y el cobre también contienen arsénico (metaloide de alta concentración en las rocas de origen volcánico de Quimsacocha) y otros metales pesados como zinc, níquel, cobre y plomo, los cuales, luego de cierto límite, son extremadamente tóxicos para la mayor parte de animales.

La extracción de volúmenes de roca afecta la acumulación y profundiza los niveles de aguas subterráneas generando acidificación por entrada de oxígeno (aire) al subsuelo. La acumulación de rocas en superficie también posibilita la acidificación que a su vez genera la dispersión de metales pesados y arsénico en aguas superficiales y suelos.

Los procesos físicos y químicos que gobiernan las transformaciones en las rocas expuestas a la intemperie y al aire en túneles y galerías son leyes naturales que no pueden ser modificadas. Los impactos ambientales por ello no pueden ser evitados ni corregidos y se convierten en pasivos ambientales cuyos costos son asumidos por las comunidades y traducidos en aguas, suelos y aire



contaminados para siempre. Las empresas mineras solo intervienen el territorio una fracción de tiempo en que los procesos apenas inician pues suelen ser perpetuos y por tanto no responderán ante los efectos de su actividad.

Para el caso del proyecto Loma Larga, no se han evaluado de manera correcta los impactos y daños que sobre el ciclo del agua generará una eventual explotación minera. Tampoco se han tenido en cuenta los riesgos a la vida a que someten a pobladores ubicados aguas abajo de la relavera.

La Corporación Terrae ha centrado sus análisis en estas temáticas, y la ausencia de argumentación alrededor de las afectaciones irreversibles para los suelos como elementos agroecológicos ni cerca de la vegetación, la fauna y el aire es dado el enfoque geoambiental del análisis independiente que hemos realizado. Nuestra evaluación se basa en el EsIA, pero no ha incluido los anexos, dada la restricción que se tiene al acceso a la información de los expedientes ambientales, situación que limita el conocimiento de los interesados y se constituye en un aspecto a revisar en un país que debe cumplir con las disposiciones de la ONU respecto al ambiente sano como derecho fundamental.

Las incertidumbres que contiene el proyecto minero y el estudio de impacto ambiental (EsIA) presentado son tales que no se puede permitir su desarrollo dado que puede colapsar para siempre la provisión de agua para consumo humano y ecosistémico. Estas incertidumbres surgen de las deficiencias en los estudios de las lluvias, en el precario entendimiento (o el completo desconocimiento) de cómo entran y se mueven las aguas en las rocas que constituyen el subsuelo y las deficiencias en acercarse al entendimiento de la complejidad de la relación entre las aguas superficiales y las subterráneas. No ha evaluado la empresa minera dónde se recargan las aguas subterráneas y cómo ellas alimentan las quebradas y los ríos.

Tampoco ha entendido la minera que su actividad puede extraer rocas con altos contenidos de arsénico a la superficie, concentrarlo, desecharlo dentro de relaves y desmontes, liberarlo por acidificación de aguas y contaminar quebradas, ríos, aire y suelos. Sabe la empresa minera que el arsénico existe y que está presente en ciertas cantidades dentro de las aguas, sin proyecto minero, pero no ha previsto que su actividad va a agudizar esta situación creando un problema que puede llevar a que las aguas no sean más una fuente de alimentación y consumo.

La empresa minera no ha realizado estudios sobre el riesgo en que se constituye su depósito de 5,5 millones de toneladas de relaves. No ha estudiado de manera responsable ni los sismos ni las lluvias que pueden inestabilizar el depósito que pretenden dejar para siempre en el territorio, ni han estudiado la respuesta de esa arenilla tóxica que son los relaves ante los sismos ni hay un modelo de hasta dónde llegaría, con qué velocidad se movería ni cuál sería la profundidad de un flujo de dichos relaves. Los relaves han causado la muerte de miles de personas cuando han fallado y las tragedias de Brasil, Chile y Canadá no se pueden olvidar.

Este proyecto se ubica aguas arriba de la ciudad de Cuenca y muchas de las personas del cantón de Azuay se surten de sus aguas y podrían ser afectadas, no solamente por la contaminación de aguas sino también por una avalancha de lodo tóxico si la relavera falla. No es posible que se le dé prelación a la extracción de metales si con ello se pone en riesgo la oferta de agua potable para decenas de miles de personas y además se pone su vida también en riesgo.

Por otra parte, existen los resultados de una consulta popular donde mayoritariamente los pobladores de las municipalidades de Cuenca y Girón se expresaron en contra de la minería en el páramo de Quimsacocha. También existen precedentes jurisprudenciales de las altas cortes judiciales en Colombia donde se pone de relevancia la inconveniencia de la minería en los páramos,



particularmente la de metálicos, y también la urgencia de la prohibición de estas actividades en esos ecosistemas estratégicos.

Si bien el contrato minero se ha firmado antes de las consultas, también es importante resaltar que varias de las actividades que se van a adelantar van a afectar todas las generaciones humanas por venir dado su carácter permanente e irreversible (impactos a perpetuidad), entre ellas:

i) La disposición perpetua de relaves en la parte más alta de la cuenca con el consiguiente riesgo de colapso y posterior flujo hacia aguas abajo, hasta un punto no determinado por la ausencia de estudios de amenaza y vulnerabilidad. De igual manera, el potencial perpetuo de escape de elementos contaminantes a las aguas provenientes de los cambios geoquímicos de dichos relaves.

ii) Las afectaciones en las aguas subterráneas, minimizadas por la empresa minera con base en la aparente desconexión entre las aguas del páramo y el sistema de aguas profundas que caminan por los macizos rocosos. No obstante, y en razón al intenso fracturamiento de dichos macizos, es obvia la interconexión de aguas y su recarga en el páramo. En este contexto, se verá con detalle que los estudios ambientales de la empresa minera no abordan cuestiones clave como la ubicación y dinámica espacial y temporal de la recarga de aguas, un entendimiento mínimo de los esfuerzos y deformaciones tectónicas que se evidencian como fracturas en las rocas, una ausencia total de análisis sobre el impacto de impedir la recarga o ubicar materiales contaminantes como los relaves en las zonas de recarga y la no evaluación (o sus deficiencias) de los impactos de las actividades mineras en el ciclo total de las aguas.

CÓMO AFECTA LA MINERÍA EL CICLO DE LAS AGUAS EN EL PÁRAMO

La relación entre aguas subterráneas y aguas superficiales es una relación natural y constituyen un solo sistema hidrológico. La actividad minera tiene un alto potencial para modificarla por la extracción de volúmenes de subsuelo y la necesidad de extraer las aguas subterráneas que tienden a inundar galerías y túneles.

Lo anterior es de gran relevancia porque a lo largo del EsIA del proyecto Loma Larga se insiste en la total desconexión del páramo con las aguas subterráneas, sugiriendo que los impactos de la excavación quedarán restringidos a profundidad, sin afectar un ecosistema de vital importancia como el de páramo.

Lo que se evidencia en la evaluación independiente de Terrae es que no hay argumentos que sustenten esta desconexión y, por el contrario, las evidencias hidrológicas, tectónicas, hidrogeológicas y geoquímicas apuntan a que la conexión efectivamente existe.

Esto tiene gran significancia porque puede implicar afectaciones al caudal de las quebradas que nacen en el páramo debido al abatimiento (descenso) del nivel de las aguas subterráneas. Es necesario indicar que el EsIA es tan contradictorio en sus afirmaciones que, a pesar de que postula una total desconexión entre aguas subterráneas y superficiales, reconoce la posibilidad de afectaciones en el caudal de la quebrada Quinuahuaycu (río Irquis) producto de la excavación (que se hará a profundidades generalmente mayores a 150 metros respecto a la superficie) y el consecuente descenso del nivel freático. No obstante, algunas evidencias presentadas en el análisis independiente de Terrae sustentan que las afectaciones pueden estar subestimadas en gran medida



a causa de la poca rigurosidad de la empresa minera en la caracterización de las propiedades hidráulicas de las rocas que constituyen el subsuelo (qué tan fracturadas están las rocas, cómo es la red de fracturas, cómo se conformó la red de fracturas y qué tan fácil se mueve el agua a través de ellas), en la caracterización geoquímica regional de los manantiales y en los errores de modelamiento hidrológico, donde de manera sistemática los caudales usados son menores que los caudales medidos.

De manera adicional a las incertidumbres en la caracterización de los potenciales impactos a las fuentes de agua de las comunidades del Azuay, tampoco se exploran escenarios de contaminación derivados de la explotación. Por el origen volcánico del páramo de Quimsacocha, el arsénico es una sustancia natural de especial interés con un alto de potencial de ser liberada a causa de la actividad minera. Como los estudios ambientales de la minera argumentan una desconexión total de las aguas subterráneas con las aguas superficiales y además se basó en pruebas inadecuadas para sustentar que las aguas subterráneas se mueven muy lentamente (casi ni se mueven, según los estudios), la movilidad del arsénico el subsuelo se daría de forma muy lenta, dadas las bajas velocidades del agua subterránea (lo que igual se constituye en una situación muy grave).

Si se considera que las aguas subterráneas tienen un grado de conexión importante con las aguas superficiales (por ejemplo, que aportan un volumen de agua significativo a las quebradas) y que la velocidad de movimiento de las aguas subterráneas es mayor (ciertos cálculos de Terrae dan resultados de velocidades 10 mil veces mayores que los de la minera) este tipo de contaminantes pasan a estar disponibles de manera inmediata en el ambiente, con un potencial de afectar a las comunidades en rangos temporales muy cortos. Lo anterior sin contar el riesgo de contaminación asociado a la relavera.

CÓMO SE HICIERON LOS ESTUDIOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS POR PARTE DE LA MINERA EN SU ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

La metodología de la empresa se puede considerar limitada, y puede inducir a errores a las autoridades ambientales en escenarios jurídicos de falsa motivación o falta de motivación de dichas autoridades.

Las inconsistencias identificadas en el estudio no solo se constituyen en errores de tipo técnico, sino que parecen tener una motivación para desestimar los verdaderos impactos que puede significar el proyecto minero Loma Larga, razón por la cual, en países como Colombia se está proponiendo, desde instancias gubernamentales, que los estudios de impacto ambiental no sean elaborados por consultores directamente contratados por las empresas mineras.

Ejemplo de ello son las afirmaciones tendenciosas como la de que el modelo numérico de las aguas subterráneas “*calculó*” o “*dio como resultado*” que el porcentaje de lluvias que recarga el subsuelo es del 1 %, argumento central en la supuesta inocuidad del proyecto minero en el ciclo de las aguas. Como se demuestra en la evaluación independiente de Terrae, este valor fue asignado por un profesional modelador de la empresa minera y no se constituye en un valor objetivo ni en un resultado del modelo.

También existe una insistencia no sustentada de una supuesta baja permeabilidad de las rocas subyacentes a los suelos de páramo:

> “*El sistema de páramo esta desconectado hidráulicamente del sistema de agua subterránea más profunda (roca subyacente) debido a que la roca subyacente es de baja permeabilidad*”.



Las rocas volcánicas presentes en el territorio de Quimsacocha solo pueden tener baja permeabilidad si están poco fracturadas y su no hay entrecruzamientos en los sistemas de fractura. Es ilustrativa a este respecto la incoherencia y las contradicciones respecto al flujo de aguas a lo largo de las fracturas, pues el estudio incluye en sus apartes de geotecnia la siguiente consideración:

> "*Las interpretaciones de los datos estructurales muestran que la masa rocosa de Loma Larga contiene un número significativo de fallas subverticales con varias orientaciones. Las manchas de color de hierro, visibles en las superficies de los fragmentos de núcleo recuperados, indican la presencia de aguas subterráneas. Esto sugiere que las fallas en Loma Larga son probablemente conductoras y pueden servir como conductos para que las aguas subterráneas entren en las galerías de la mina subterránea*"

Por un lado, se dice que las rocas son de baja permeabilidad y por otro se dice que las rocas están fracturadas y que las fallas geológicas son "probablemente conductoras". Evidentemente hay estas contradicciones lo menos que ilustran son incertidumbres tan gruesas que no permitirían viabilizar el proyecto pues puede afectarse irreversiblemente el ciclo del agua.

De igual manera se encuentran apreciaciones totalmente subjetivas y sin soporte como la siguiente:

> *Debido a que la cantidad de agua en esta roca subyacente profunda existe principalmente en fracturas y grietas y es pequeña, no cumple con la definición de un acuífero y no es una fuente importante de suministro de agua subterránea a los ríos y quebradas*

Que un profesional opine sobre lo que es pequeño sin acotar con cifras que sean verificables y contrastables es antitécnico y que con base en sus opiniones defina lo que es o no importante cuando se trata de un elemento vital para la preservación de un modo de vida o de la posibilidad de seguir poblando un territorio es inaceptable.

Pero también las omisiones revisten de extrema gravedad, pues ignoran aspectos fundamentales que el estudio de impacto ambiental debería tener en cuenta. Entre ellas se puede mencionar la elección totalmente subjetiva del área de influencia, en la cual se excusa la empresa minera para realizar una caracterización bastante sesgada en términos espaciales, la concentración de puntos de medición de datos hidrogeológicos en un área que corresponde al 1 % del área total de modelamiento, situación claramente insuficiente, antitécnica y temeraria. También la ausencia total de aspectos de fracturamiento (direcciones, inclinaciones, aperturas, campos de tensores de esfuerzos y de conductividades, entre otras) y de hidrogeoquímica, de levantamiento de inventario de manantiales, entre otras.

Asimismo, la ligereza con la que se aborda lo relacionado con la contaminación por arsénico es riesgoso para los pobladores del territorio y para su salud en caso de que se tomara una decisión favorable a la explotación, situación que se demuestra entre otras cosas con la ausencia de modelos de transporte que exploren escenarios críticos de dispersión de este y de otros metales pesados que existen en las rocas y los suelos y que pueden ser liberados por la actividad minera tales como níquel, plomo, zinc y cobre (no se ha evaluado por parte de la empresa la existencia de otros metales pesados tóxicos como el cadmio). En este aspecto, es evidente que el territorio se encuentra en un equilibrio precario en términos de la liberación de arsénico y ciertos metales pesados como los ya mencionados y, por tanto, cargarlo con el desecho de millones de toneladas de rocas y relaves que también tienen el potencial de liberarlos, puede desequilibrar completamente la calidad de las aguas y generar con ello un impacto social incalculable. Por estas razones, la ligereza de la empresa



minera no da las bases para una decisión en positivo respecto a la viabilización de la explotación minera.

LAS DEFICIENCIAS Y AUSENCIAS EN EL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL EN ESTUDIOS DE LLUVIAS Y DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

Los procesos de un sistema hidrológico son lo suficientemente complejos como para que, en cada caso, quien analiza el sistema establezca una percepción sesgada del funcionamiento del mismo. Las hipótesis planteadas en el documento del EsIA evidencian una deficiencia en la comprensión de las relaciones de los procesos hidrológicos entre el sistema superficial y subterráneo, sin embargo, para los habitantes del territorio del páramo de Quimsacocha y sus alrededores es un hecho que, tanto espacial y temporalmente las aguas superficiales y las aguas subterráneas están conectadas físicamente con asociaciones valiosas cuya comprensión establecería grandes oportunidades para su gestión y conservación.

Por un lado, la cantidad de lluvias calculada por la minera y usada para el modelamiento hidrológico, el cálculo de obras y el diseño de relaves, así como para el modelamiento hidrogeológico son menores que la cantidad de lluvias medida, con lo cual se parte de errores y supuestos que minimizan impactos y llevan a incorreciones en las medidas de manejo. Por otro, las relaciones entre el agua subterránea y el agua superficial en estas cuencas no pueden ignorarse, ya que las aguas subterráneas representan un flujo de agua tan importante dentro de cualquier cuenca hidrográfica como el flujo de agua superficial, desconocer estas relaciones puede poner en riesgo tanto la calidad como la cantidad de las reservas de agua en la región del páramo de Quimsacocha.

El estudio omite la existencia de las áreas previamente definidas por ETAPA como zonas de recarga, desestimando la importancia de las mismas para el abastecimiento de agua en la región. Ni siquiera se plantea un escenario con las obras que permita determinar las posibles intervenciones sobre las coberturas y los patrones de drenaje en estas cuencas, que potencialmente afectarían las fuentes hídricas aguas abajo de la explotación, en términos de caudales y regulación hídrica.

LAS DEFICIENCIAS EN EL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DE CÓMO LA MINERÍA PUEDE AFECTAR LA CALIDAD DE LAS AGUAS

Ya se mencionó que la minería posibilita la extracción, concentración y dispersión de elementos tóxicos que son extraídos y dispuestos como desechos en la superficie y dentro del subsuelo (con ausencia de oxígeno) están en equilibrio geoquímico. Dentro de estos efectos, es de particular relevancia que el proyecto minero Loma Larga o cualquiera que pretenda extraer rocas del subsuelo en el páramo de Quimsacocha podría aumentar el contenido de arsénico, que ya tiene concentraciones perceptibles tanto en el agua como suelos alrededor del área que sería intervenida. Es posible que existan razonamientos no garantistas y reactivos al principio de precaución en el sentido de que ya el arsénico existe y por tanto la minería no generaría problemas diferentes a los ya existentes de manera natural en un territorio. No obstante, la minería tiene el potencial de extraer y disponer en el ambiente cantidades muy altas de estos tóxicos y de generar las condiciones para su dispersión (aguas ácidas) y ello no puede ser permitido en un territorio donde los elementos químicos naturales ya muestran concentraciones cercanas a los límites permitidos para aguas con uso para humanos, sea para consumo directo o par uso agropecuario.

Si bien el estudio de impacto ambiental reconoce que en Loma Larga hay presencia de arsénico, cobre y plomo, no hay análisis suficientes que descarten la presencia de otros metales pesados



como mercurio, cadmio, selenio, molibdeno, bismuto y telurio, entre otros que también son reconocidos como peligrosos para la salud humana y ecosistémica.

Las omisiones de información y técnicas que se identifican a lo largo del EsIA dejan ver que la presencia de arsénico en el medio no es un tema que preocupe a la empresa, ya que no se ahonda en el tema ni se plantea el porqué de la presencia de arsénico y otros metales pesados en el ambiente, y menos aún cómo controlarlos, si es que ello fuera posible.

Una muestra de ello es el incumplimiento respecto al tiempo de monitoreo de calidad de agua superficial necesario para el estudio, o la justificación de la empresa a no evaluar el contenido de arsénico y otros elementos tóxicos en los sedimentos activos de cuerpos de agua dentro del área del proyecto. Esto permite concluir que la empresa minera desconoce realmente las condiciones actuales del área que pretenden intervenir en lo que corresponde a calidad de agua y elementos tóxicos disponibles en el medio y que pueden liberarse por su actividad.

Este desconocimiento se refleja también en la evaluación de los posibles impactos, al no hacerse una evaluación particular del comportamiento de elementos tóxicos como el arsénico y otros metales pesados que se han identificado por su presencia en áreas de minería de metálicos a lo largo y ancho del mundo. Es bien sabido que la movilidad de estos elementos no puede evaluarse como la de cualquier contaminante, dadas sus particularidades químicas y el riesgo que representan para la salud humana y de los ecosistemas.

Si bien la normativa ecuatoriana no exige explícitamente estudios enfocados a esta evaluación, es responsabilidad de empresas mineras de varios años de experiencia tener en cuenta aspectos básicos y ampliamente conocidos como lo es la liberación y disponibilidad de arsénico y metales pesados en drenajes mineros, dentro de sus estudios ambientales.

No es de ninguna manera responsable que, en un escenario de contaminación, de restricción al acceso de agua de calidad para el consumo humano y de eventuales afectaciones a la salud pública, en el EsIA se recomiende

> *"(…) a futuro, estudios con más detalle para explicar la presencia de las altas concentraciones de esos elementos (As, Cu y Pb) (...)"*

Este tipo de recomendaciones por parte de la empresa minera muestra que por una parte no hay una caracterización suficiente sobre los riesgos del proyecto en un tema tan sensible como la eventual contaminación de las aguas por parte de las actividades relacionadas con el proyecto minero y por otra, evidencia que para la empresa minera y sus consultores la salud pública no es un aspecto central en los estudios que viabilizarían la explotación de metales en un páramo que surte de agua a decenas de miles de personas.

DEFICIENCIAS Y AUSENCIAS EN EL ABORDAJE DEL RIESGO EN EL PROYECTO MINERO, PARTICULARMENTE EN LA RELAVERA.

El proyecto está implantado en zonas con algunas evidencias de procesos de inestabilidad (movimientos en masa). La relavera está ubicada (al menos parcialmente) en zona de amenaza media-alta por movimientos en masa. No obstante, no existe en los estudios de la empresa minera un inventario de dicho tipo de procesos que pueda calibrar los modelos de inestabilidad regionales que fueron presentados. Si un depósito de relaves tiene movimiento por problemas de soporte de



los suelos sobre la que fue emplazada pueden generarse presiones en los poros y puede llevarse la estructura al colapso.

De particular relevancia son las deficiencias en el estudio de los desechos del proceso de beneficio minero denominados relaves o colas. Estos resultan de la trituración y molienda de las rocas con concentraciones de metales como el oro y el cobre que viabilicen su beneficio. El producto es una arenilla (tamaños de grano de arena muy fina y limos gruesos) que puede ser dispuesta en un depósito con cantidades variable de agua. Para el caso de Loma Larga se propone una tipología denominada relaves filtrados (algunas veces en el EsIA se usa de manera sesgada el adjetivo de secos) donde el porcentaje de agua varía entre el 15 y el 20 %.

Por otra parte, el proyecto se propone de extracción subterránea (túneles y galerías), con lo cual la caracterización de las rocas en función de su (in)estabilidad es fundamental. Ya se anotó que las fracturas no fueron caracterizadas en función de su importancia como repositorio y camino de las aguas subterráneas y tampoco lo fueron en términos de su resistencia y estabilidad.

No hay caracterización mecánica de los materiales (ni naturales ni relaves), dejando el análisis geotécnico al juicio de experto. Por ello, el modelamiento de lo que puede suceder con túneles, galerías, cortes a cielo abierto y la propia relavera no se presenta en términos de escenarios de lluvias y/o sismos. Con ello, no hay argumentos que permitan a una autoridad ambiental o minera establecer si el proyecto minero ha sido diseñado de manera responsable.

Los materiales geológicos no han sido parametrizados, es decir que no se les han dado características de resistencia a partir de mediciones en campo y en laboratorio que permitan establecer su estabilidad geotécnica. Esto aplica para las excavaciones subterráneas y para la relavera. Los materiales naturales no han sido estudiados o su análisis no se presenta en el EsIA en función de una cartografía (mapas de unidades) ni de caracterización de fracturas en las rocas y su relación con las características de los macizos rocosos.

La relavera y el desconocimiento de su comportamiento y peligrosidad

Los relaves filtrados han sido promocionados por empresas mineras como alternativas a la disposición de relaves con alto contenido de agua (pulpas) y generalmente en condiciones de saturación. El contenido de agua cuando los relaves filtrados son depositados se encuentra en el rango del 15 al 20 %. Golder Ltd., la mayor empresa de consultoría minera en el mundo, ha definido que este tipo de relaves tiene limitaciones cuando las lluvias en la zona de disposición supera los 50 mm al mes. En el caso de Loma Larga, los datos de 7 estaciones hidrometeorológicas presentadas en el EsIA superan en la totalidad de los meses las cantidades críticas (con excepción de la estación PMLL001 donde en julio, agosto y septiembre llueve entre 36 y 42,7 mm y la estación PMLL09 donde en agosto llueven 46 mm y en septiembre 45 mm).

También se enfatiza por parte de Golder sobre la inconveniencia de emplazar este tipo de relaves en zonas con sismicidad moderada a alta. Los análisis sobre estos temas desarrollados en el EsIA son precarios a pesar de registros recientes para la zona de sismos con magnitudes incluso superiores a 6,0. En ese escenario, los análisis de estabilidad deben incluir efectos de fuente cercana que afecten las estructuras a construir. Sin embargo, no se incluyen los sismos registrados antes de 2012, ni los sismos históricos.

Adicionalmente, los drenajes de la relavera se han diseñado con deficiencias y no se observan diseños de las redes de subdrenaje y los canales están diseñados para periodos de retorno de 100



años, lo cual no es suficiente para asegurar la estabilidad, especialmente en áreas de alta precipitación como lo es la zona de estudio.

Es importante destacar que el peor escenario de contingencias es un colapso del depósito de relaves, con estos materiales fluyendo aguas abajo a alta velocidad. Ese escenario no fue modelado a pesar de que los desechos estarán el territorio para siempre. La ausencia del análisis de falla del depósito de relaves implica no contar con la posible trayectoria y velocidad del material, el área de afectación, los elementos expuestos y, por tanto, sus posibles impactos en el ecosistema natural y comunidad. Adicionalmente, conlleva no tener una hoja de ruta clara para cuando se presente una emergencia producto de este escenario de riesgo. Incluso, que en el EsIA se considere el riesgo de falla de relave como irrelevante se basa eventuales buenas prácticas ingenieriles, siendo este planteamiento irresponsable porque el riesgo, aunque puede ser disminuido, existe y deben evaluarse los escenarios extremos por la implantación de una estructura amenazante en el territorio.

La irresponsabilidad de la empresa minera es aún mayor si se considera el cambio climático pues de acuerdo con el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) “La frecuencia de eventos extremos de temperatura y precipitación en el clima actual cambiará con el calentamiento (…) y las precipitaciones extremas se vuelven más frecuentes en la mayoría de los lugares (muy probable)

Adicional a lo relacionado con la relavera, es importante anotar que no se presentan análisis de estabilidad geotécnica ni en los túneles y galerías ni en la relavera que permita garantizar la seguridad del proyecto. Existen criterios numéricos que permiten aproximarse a si los abordajes son garantistas o no y que pueden ser factores de seguridad o probabilidades de falla resultantes del modelamiento de materiales geológicos y antrópicos, su parametrización con base en datos de laboratorio y campo y el modelamiento ante escenarios normales o críticos (lluvias y / o sismos). Todo ello falta en los estudios presentados por la minera.

No hay plan de mantenimiento y seguimiento para el proyecto, sin tener claridad en la implementación de un plan de contingencia. No se establecen los parámetros a ser medidos, ni hay una ubicación ni una frecuencia. Cualquier contingencia tiene la probabilidad de convertirse en desastre por la falta de previsión que se muestra y la ausencia de definición de amenazas tanto para el territorio como para el propio proyecto minero.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La principal conclusión es que un proyecto minero que se ubica en un páramo que es fundamental en la provisión de agua para decenas de miles de personas no es viable. La minería expone grandes cantidades de rocas extraídas del subsuelo y las desecha en superficie (botaderos o desmontes y relaves o colas) a una tasa tan rápida que se genera desequilibrio y contaminación. Existen incertidumbres no aceptables en cuanto al conocimiento del ciclo del agua en la zona y al potencial de contaminación que pueda generar la actividad minera sobre un geosistema que involucra rocas con arsénico y metales pesados.

Los páramos son ecosistemas reconocidos como fundamentales en el ciclo del agua y en Quimsacocha se puede observar un doble funcionamiento como acumulador y como zona de recarga de acuíferos. Dado que este último aspecto tiene importancia de rango constitucional en



Ecuador, no es posible que con estudios que asumen desconexiones entre aguas subterráneas someras y profundas, sin ningún dato de soporte, se arriesgue la provisión de agua para decenas de miles de personas y para otros ecosistemas como los bosques altoandinos. Este daño sería perpetuo.

Los relaves son desechos propios de la minería de metálicos que por un lado contaminan aguas y suelos y por otro se constituyen en bombas de tiempo que son emplazadas aguas arriba de pobladores humanos del territorio. El enfoque preventivo que debería ser adoptado por las autoridades ecuatorianas es la prohibición de la disposición de relaves a cielo abierto

Por las razones citadas y por otras relacionadas con la afectación ecosistémica y el cambio en el uso del suelo, la afectación simbólica y espiritual de un territorio donde la minería no es una actividad compatible con usos y tradiciones, la licencia ambiental para el proyecto debe ser negada.



EVALUACIÓN TÉCNICA GEOAMBIENTAL, HIDROLÓGICA Y DE RIESGOS DEL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA EL PROYECTO MINERO LOMA LARGA PRESENTADO POR LA EMPRESA INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)

1. COMPONENTE HIDROLÓGICO

El proyecto minero Loma Larga, (conocido antes de 2012 como Quimsacocha) proyecta una mina subterránea para extraer oro, plata y cobre con una duración total de 16 años (todas las etapas), se encuentra dentro de la cordillera ecuatoriana, en la región del páramo de Quimsacocha, muy cerca de la depresión interandina del Ecuador a menos de 20 km al suroeste de la ciudad de Cuenca al sur de Quito y menos de 20 Km al suroeste de la ciudad de Cuenca, a 17 Km de Tarqui, 15 Km de Victoria del Portete, a 12 Km de Girón, 7 Km de San Fernando, a 6 Km de Chumblín y a 5Km de San Gerardo (Perez, 2012)[1]. Para estas poblaciones el páramo de Quimsacocha es un territorio estratégico de suma importancia para la sobrevivencia y la economía local dado que abastece varios sistemas de captación de agua para consumo humano y para riego (Torres, 2015)[2]

Esta sección desarrolla una revisión de los aspectos hidrológicos evaluando la pertinencia del marco de referencia hidroclimatológico presentado para el área de estudio, el cual incluye la delimitación del área de influencia y la caracterización de línea base hidroclimática presentada en el EIA, en relación a la cantidad y uso del agua.

1.1 Marco de referencia.

1.1.1 El ciclo hidrológico

La hidrología es la ciencia que estudia las aguas terrestres, así como su origen, movimiento y distribución en nuestro planeta, es decir, el ciclo del agua o ciclo hidrológico. El ciclo hidrológico representado en la figura 1 es el conjunto de transferencias de agua entre la atmósfera, tierra y mar considerando sus tres estados: sólido, líquido y gaseoso donde el motor de este movimiento es la energía proveniente del Sol.

El ecosistema de páramo se caracteriza por bajas temperaturas y consumos de agua muy bajos dado la predominancia de coberturas de pajonales y hierbas xerofíticas que se caracterizan por tener bajas magnitudes de evaporación a pesar de la alta radiación que se presenta en las altitudes y latitudes donde se encuentran los páramos (Buytaert, 2004)[3] Dado que el agua no permanece estática, una fracción del agua que precipita y que no escurre por los cauces de los ríos y quebradas, se percola luego de saturar el suelo produciendo en algunos casos una escorrentía subsuperficial concepto que describe el agua que se desplaza sobre el nivel freático y sale posteriormente a los cauces otro porcentaje restante de agua que se percola es considerada recarga de agua subterránea

---

[1] Pérez Guartambel, C. (2012). Agua u Oro. Kimsakocha, la resistencia por el agua.

[2] Torres, N., 2015. La declaratoria del macizo del cajas como reserva de la biosfera y la minería a gran escala. Posibilidades y contradicciones en el caso de Quimsacocha, Flacso, Quito.

[3] Buytaert, W. 2004. The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology. Ph.D. thesis, Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences. Katholieke Universiteit. Leuven.



o en algunos casos donde el agua vuelve a emerger a la superficie después de un tiempo prolongado denominándose escorrentía subterránea.

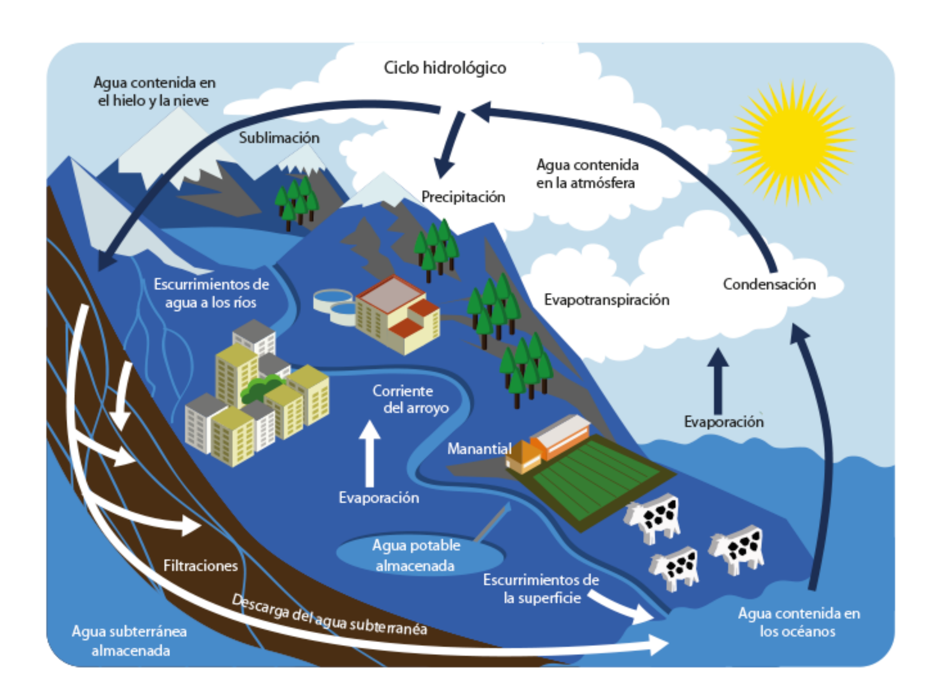


FIGURA 1. CICLO HIDROLÓGICO.
FUENTE: IDEAM, 2015

1.1.2 Cuencas y unidades de zonificación

Una cuenca hidrográfica o hidrológica es una parte de la superficie terrestre en la cual el agua precipitada (principalmente lluvia y en ocasiones granizo) se transfiere desde los puntos más altos del terreno a los puntos más bajos fluyendo por medio de las quebradas, caños y ríos que conforman el sistema de drenaje, estas aguas fluyen y se descargan finalmente en un colector (otro río, lago, océano).



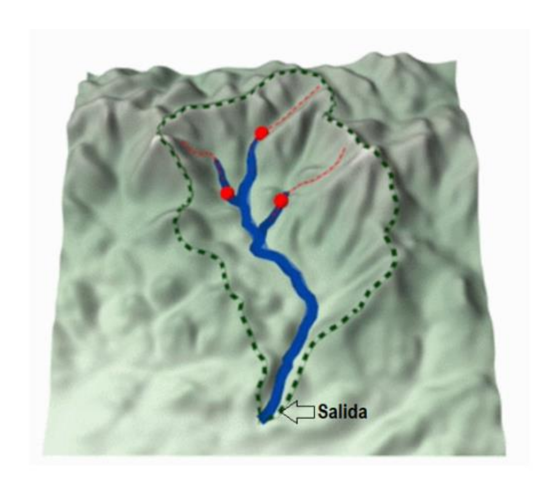




FIGURA 2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA CUENCA HIDROLÓGICA. FUENTE: MODIFICADO DE UCAR, 2010.

La hidrología superficial es la rama que estudia los eventos y procesos hidrológicos que ocurren en la superficie terrestre a los que llamaremos escorrentía superficial, la cual corresponde a la lámina de agua que escurre a lo largo de las laderas puede ser interceptada por las depresiones naturales del terreno, en donde se evapora o infiltra; o, por último, se mueve a través de los drenajes naturales de la cuenca y forma el flujo superficial. La cuenca hidrológica, junto con los acuíferos, son las unidades fundamentales de la hidrología.

Estos tres flujos –superficial, subsuperficial y subterráneo– conforman los cauces de las corrientes, alimenta los diferentes almacenamientos y drenan finalmente al mar (Ideam, 2015)[4]

Los principales parámetros que afectan el ciclo hidrológico son: La intensidad de la precipitación (lluvia); la capacidad de infiltración de una superficie particular, la condición hidráulica a la que se encuentra el suelo o la roca y las características hidráulicas del suelo o roca.[5]

1.1.3 Elementos climatológicos

Para caracterizar el comportamiento de la atmósfera, y su interacción con el terreno se utilizan variables como la precipitación, la temperatura del aire, el contenido de humedad, la velocidad y dirección del viento, la presión atmosférica, la nubosidad, la radiación, la evaporación entre otros.

Estas variables pueden ser analizadas en escalas diarias, mensuales e incluso anuales y minutales sin embargo la escala más utilizada por los científicos e investigadores es la escala diaria, para tener un análisis adecuado del comportamiento de estas variables, es decir para entender la climatología de una región de estudio es necesario contar con datos que abarquen periodos de tiempo de 20 años o más (Puyol et al., 2013).[5]

[4] IDEAM, (2015). Sistema de información del recurso hídrico.

[5] Puyol, A. F. B., & Villa, M. A. J. (2013). Principios y fundamentos de hidrología superficial. Universidad Autònoma Metropolitana, Unidad Iztapalpa.



1.1.4 Estaciones hidroclimatológicas

Para tener conocimiento de los valores que presentan cada una de las variables o elementos climatológicos existen dispositivos diseñados para cuantificar cada una de las variables presentadas, estos instrumentos cuentan con normas y manuales expedidos por la Organización Mundial de Meteorología (WMO por sus siglas en inglés).

Algunos de los más conocidos son los termómetros para medir la temperatura, los pluviómetros y pluviógrafos para medir y registrar la precipitación de la lluvia, los higrómetros para medir la humedad relativa, los tanques evaporímetros para medir la evaporación, aunque en ocasiones esta variable es calculada debido a la falta de este instrumento y los barómetros y barógrafos para medir la presión atmosférica, entre otros instrumentos con variadas tecnologías.

También en el campo de la hidrología existen instrumentos que permiten medir el volumen de agua que transporta una corriente en determinado intervalo de tiempo es decir el caudal el cual es expresado generalmente en unidades de litros/segundo o metros cúbicos por segundo dependiendo de la magnitud de la corriente de agua. Los instrumentos que nos permiten medir y registrar esta variable se denominan limnímetros o limnígrafos. En la actualidad existen estaciones automatizadas para medir de manera remota estas variables.

1.1.5 Modelos hidrológicos

La estimación de las cantidades de agua que corresponde a cada uno de los procesos hidrológicos interactivos dentro de una cuenca suele determinarse mediante un balance hidrológico, determinado por una ecuación de balance de masa donde la diferencia entre los valores de entrada y los valores de salida determinan la variación de agua almacenada en la cuenca en un determinado periodo de tiempo. Algunas prácticas humanas conllevan impactos sobre el ecosistema de páramo que modifican las coberturas y los suelos produciendo impactos y variaciones del balance de agua en las cuencas que dificultan la cuantificación de los procesos del ciclo hidrológico.

Para representar las cuencas y entender de manera simplificada su funcionamiento se construyen prototipos que explican su comportamiento físico de forma matemática, donde se representa el sistema real mediante expresiones analíticas, a estos prototipos se les conoce con el nombre de modelos hidrológicos.

En un modelo hidrológico, el sistema físico real que generalmente representamos es la 'cuenca hidrográfica' y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático nos ayudará a tomar decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas al sistema y salidas del sistema, para verificar si el modelo es representativo del prototipo.

1.1.6 Cambio climático

La variación en el estado climatológico inducido por los impactos de la acción humana sobre nuestro planeta puede afectar los promedios de las variables climáticas, así como sus extremos. El cambio climático puede tener consecuencias graves sobre los ecosistemas de páramo pues los fuertes incrementos en la temperatura global y las modificaciones drásticas en los regímenes de lluvias podrían alterar el suelo y la vegetación, adicionalmente se ha evidenciado el retroceso de los

glaciares en algunas zonas de Latinoamérica como Colombia y Ecuador[6] los aumentos en la temperatura pueden contribuir en una mayor evaporación del agua, así como efectos sobre la precipitación orográfica. Dada la importancia de estos ecosistemas en relación con el abastecimiento de agua a ciudades importantes sobre la cordillera de los Andes como por ejemplo Cuenca, Quito y Bogotá, se considera importante establecer el impacto de los cambios de uso de la tierra y el suelo en los ecosistemas de páramo y las laderas andinas (Buytaert et al., 2006)[7]

1.2 Análisis del marco de referencia EsIA

1.2.1. Hidroclimatología en los páramos en los Andes y en el sur de Ecuador

Aunque es difícil aproximar las áreas de páramo dada la variedad de metodologías, se estima que, con aproximadamente 12.603 kilómetros cuadrados, el 5,1 % del territorio del ecuador corresponde a extensiones de ecosistema de páramo[8]. Según la Ley de Desarrollo Forestal Sustentable del Ecuador, así como, en la Ley de Conservación y Uso Sustentable de la Biodiversidad. Los páramos se definen como: "*Ecosistema tropical altoandino que se extiende en los Andes septentrionales, entre el actual o potencial límite superior de bosque andino cerrado y la línea de nieve perpetua, caracterizado por una vegetación dominante no arbórea, alta irradiación ultravioleta, bajas temperaturas y alta humedad.".* Según los mismos autores citados por INV Metals - Cardno Entrix (2021), estos ecosistemas juegan un papel fundamental en la regulación hidrológica y en la provisión de agua para las poblaciones.[9] De acuerdo con el mismo informe de EsIA *"(…) En el área de estudio se tiene un ambiente típico de un ecosistema de páramo, donde es característica la presencia de zonas de pajonales y humedales y/o almohadillas con suelos dominantes Andosoles e Histosoles (Quichimbo and Cisneros,2013)"*[10] este tipo de suelos suelen tener una densidad aparente muy baja estimada entre los 0,1 y 0,8 g cm^{-3}, una alta capacidad de retención de agua de cerca de 0,9 cm^3 cm^{-3} a punto de saturación, y una conductividad hidráulica saturada alta de entre 10 y 60 mm h^{-1} (Buytaert 2004; Buytaert et al. 2005b, 2006b; Crespo et al. 2011a).

La porosidad de los suelos de tipo Andosol (relacionados con la caída y transformación de cenizas volcánicas) facilita la infiltración y además estos suelos cuentan con una alta capacidad para retener el agua. Dado que en estos ecosistemas la mayor parte de los eventos de lluvia tienen intensidades menores a la capacidad de infiltración del suelo, la mayor parte del volumen de agua lluvia puede infiltrarse, de acuerdo con las siguientes tablas del EsIA en una condición de suelo saturado el contenido de agua sobrepasa entre el 47,3 % y el 88 % de su volumen, situación que indica la facilidad con la cual el agua lluvia puede infiltrarse en el suelo.

---

6 http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Fuertes+Impactos+del+Cambio+Clim%C3%A1tico+en+los+P%C3%A1ramos+de+Colombia.pdf/932d5138-9d91-45ac-baa8-4295634aeffb

7 Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2006). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. Cuenca. Recuperado: http://www. páramo. org/files/hidrologia_páramo. pdf.

8 Hofstede, R.; Segarra, P.; Mena, P. V: 2003. Los Páramos del Mundo. Global Peatland Initiative/NCIUCN/EcoCiencia, Quito.

9 Buytaert, W., Célleri, R., Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006a). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. Earth-Science Reviews, 79(1–2), 53–72

10 INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio



Tabla 6-68 Porosidad (valores porcentuales promedio) de los suelos (basados en los datos de 18 perfiles de suelos) organizados por horizontes

Suelo	Horizonte	Porosidad (%)
Histosol	H	88,0
	A	86,4
	B	66,0
	C	59,4
Andosol	A	78,2
	B	58,5
	C	63,0
Cambisol	A	68,5
	C	47,3

Fuente: Reporte de Laboratorio de Física de Suelos de la Universidad de Cuenca, octubre de 2020.
Elaboración: P. Quichimbo, abril 2021

Tabla 6-69 Valores promedio de la conductividad hidráulica saturada (Ksat) para la profundidad dominante de las raíces por tipo de suelo en el área de estudio – basados en los

Suelo	K_{sat} (cm h^{-1})
Histosol	1,7 (0,99)
Andosol	0,84 (1,17)
Cambisol	0,34 (0,16)

Fuente: Levantamiento de suelos, junio a agosto 2020.
Elaboración: P. Quichimbo, abril 2021

TABLA 1. VALORES PROMEDIO DE POROSIDAD (ARRIBA) Y DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA (ABAJO) EN EL ÁREA DE ESTUDIO. TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[11]

Se encontró en investigaciones desarrolladas por algunos autores citados en el EsIA que:

1. *"De acuerdo con las investigaciones realizadas por Crespo et al. (2011a, 2011b), en condiciones secas el flujo lento es controlado principalmente por el flujo lateral a través del horizonte C y las grietas en la capa superficial de la roca meteorizada. Esto quiere decir que cuando el suelo se encuentra más seco estas capas contribuyen a la generación de caudal predominantemente correspondiente al llamado "flujo base" o de verano. El agua subterránea en los estratos rocosos aparentemente no contribuye en la generación de caudal. Sin embargo, hace falta más investigación en este campo ya que esta condición depende del tipo de geología de cada lugar y no es posible generalizar estas conclusiones a todos los páramos. De acuerdo a Crespo et al. (2011b) los resultados sugieren una rápida infiltración del agua a las capas profundas, lo cual significa una recarga de los horizontes más profundos cuando la humedad de los superficiales es mayor."*[12]

Lo anterior establece que la relaciones entre la hidrología superficial y la hidrología subterránea se encuentran mediadas por las condiciones y características del suelo, sin embargo, frente a la percolación, es la geología de cada lugar un condicionante importante.

[11] Ibid.

[12] Crespo P et al, 2014. Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. En: Cuesta F, Sevink J, Llambí LD, De Bièvre B, Posner J, Editores. Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos, CONDESAN. Pag 298



En otras investigaciones algunos autores como Torres y Proaño, (2018)[13] establecen que hidrológicamente el páramo es un ecosistema que presenta una buena regulación de los caudales bases, donde el comportamiento de los parámetros que integran la dinámica hidrológica se caracterizan por contenidos de humedad entre la capacidad de campo y el punto de saturación, relacionados con el alto contenido de materia orgánica, alta porosidad y baja densidad aparente, así como percolaciones altas cuando se relacionan con la presencia de geoestructuras porosas.[14]

A lo largo de las últimas décadas es ampliamente aceptado por la comunidad académica que las actividades humanas, reducen la capacidad de infiltración de los suelos de páramo, dado que estos son muy propensos a daños irreversibles, lo cual manifiesta diversas preocupaciones sobre el pastoreo intensivo, sin embargo, para los autores del EsIA y otros documentos citados en el mismo el establecimiento de actividades extractivas como la minería no parece ser un tema relevante.

Los procesos de un sistema hidrológico son lo suficientemente complejos como para que, en cada caso, quien analiza el sistema establezca una percepción sesgada del funcionamiento del mismo, las hipótesis planteadas en el documento del EsIA evidencian como en el paradigma actual aun es deficiente la comprensión de las relaciones entre el sistema superficial y subterráneo de los procesos hidrológicos, sin embargo para los habitantes del territorio del páramo de Quimsacocha es un hecho que tanto espacial y temporalmente las aguas superficiales y las aguas subterráneas están conectadas físicamente con asociaciones valiosas cuya comprensión establecería grandes oportunidades para su gestión y conservación.

De acuerdo con Beven, K. (2011)[15] es muy común y conveniente que se establezcan hipótesis erróneas como que el lecho rocoso que subyace a las cuencas de altiplanos es impermeable, sin embargo:

> *"(…) incluso en rocas que tienen poca o ninguna permeabilidad primaria en la matriz a granel. La presencia de permeabilidad secundaria en forma de juntas y fracturas puede proporcionar vías de flujo y almacenamiento importantes que pueden ser efectivos para mantener los flujos base de los arroyos durante períodos de tiempo más prolongados. (…) Existe una posibilidad interesante de que los sistemas de fractura conectados que están llenos de agua puedan actuar como sistemas de tuberías, transmitiendo los efectos de la recarga muy rápidamente. Recuerde que, si se agrega agua a un extremo de una tubería llena de agua, habrá un desplazamiento casi instantáneo de agua fuera del otro extremo, cualquiera que sea la longitud de la tubería e incluso si las velocidades de flujo en la tubería son relativamente lentas. La razón es que la transmisión del efecto de presión al agregar el agua es mucho más rápida que la velocidad real del flujo del agua. Tales efectos de desplazamiento son una explicación de las respuestas rápidas del subsuelo a las lluvias torrenciales"*[16] Beven, K. (2011)

[13] Torres Romero, S. F. y Proaño Santos, C. O. 2018. Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 28(2):52-66.
[14] ibid
[15] Beven, K. J. (2011). Rainfall-runoff modelling: the primer. John Wiley & Sons.
[16] Ibid.



Lo anterior constituye una breve explicación de un modelo perceptual de una cuenca hidrológica, sin embargo, una cuenca puede tener comportamientos diferentes es sus diferentes zonas altitudinales y bajo diferentes condiciones y momentos.

En Beven, K. (2011) se presentan varios modelos perceptuales como una clasificación de los mecanismos de proceso en la respuesta de las laderas a las precipitaciones: *"(a) exceso de infiltración de infiltración (Horton, 1933); (b) exceso de flujo terrestre de infiltración de área parcial (Betson, 1964); (c) exceso de flujo terrestre de saturación exceso de flujo superficial de saturación (Cappus, 1960; Dunne y Black, 1970); (d) flujo de tormenta subsuperficial (Hursh; Hewlett); (e) saturación perchada y flujo pasante (Weyman, 1970)."*[17]

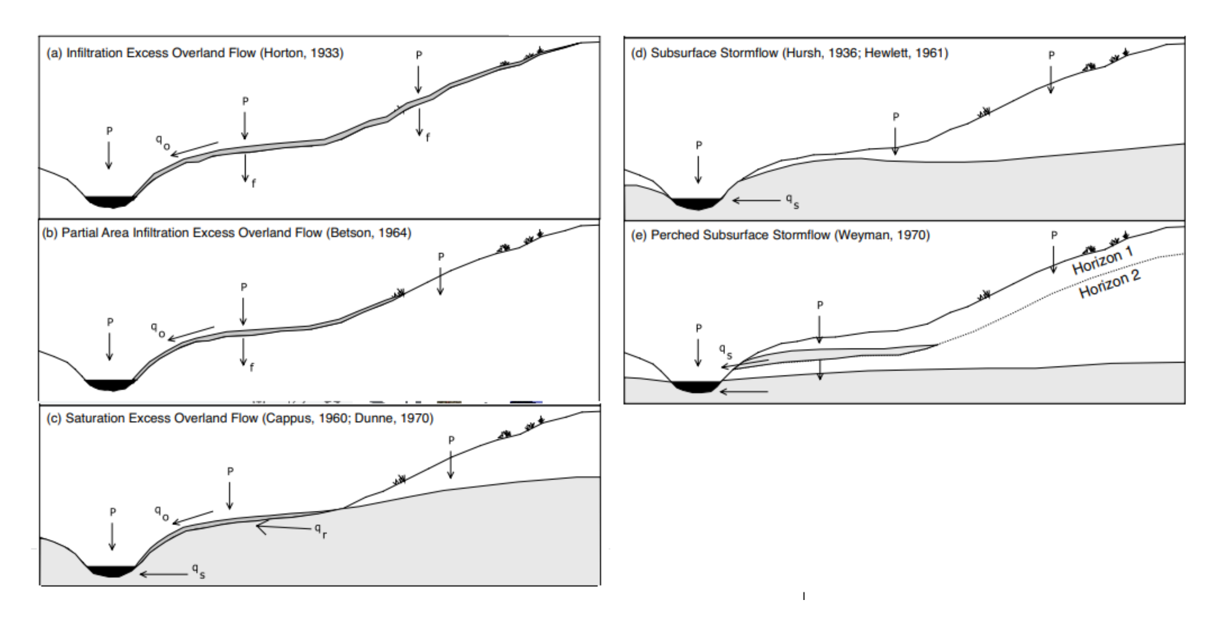


FIGURA 3. CLASIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE PROCESO EN LA RESPUESTA DE LAS LADERAS A LAS PRECIPITACIONES TOMADO DE BEVEN, K. J. (2011).

Un modelo perceptual resume el entendimiento del comportamiento de una cuenca en un modelo de entradas y salidas, frente a eventos como la precipitación identificando las posibles relaciones entre los elementos del ciclo hidrológico sub y superficial, en Guzmán et al. (2015)[18], asumen los modelos perceptuales planteados en Beven, K. (2011) para las subcuencas de Yanuncay y la subcuenca de Tarqui, obteniendo una hipótesis de tres modelos perceptuales (A, B y C).

En la siguiente figura se presentan las ilustraciones de Guzmán et al. (2015) y Llambí et al. (2012)[19], los cuales, al igual que otros autores citados en el EsIA, establecen bajo una hipótesis no comprobada de inexistencia de fracturas en la zona de páramo, la adopción de un modelo tipo A correspondiente al páramo, estableciendo que la respuesta hidrológica se compone de flujo subsuperficial lateral (Qss) y superficial ($Qsup$); en este tipo de ecosistemas la recarga profunda de

[17] Íbid.

[18] Guzmán, P., Batelaan, O., Huysmans, M., & Wyseure, G. (2015). Comparative analysis of baseflow characteristics of two Andean catchments, Ecuador. Hydrological Processes, 29(14), 3051–3064. https://doi.org/10.1002/hyp.10422

[19] Llambí, L., Bièvre, B., Célleri, R., Ochoa, B., Borja, P., & Soto, A. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos.



aguas subterráneas es menos probable debido al lecho impermeable a poca profundidad (Guzmán et al., 2015; Llambí et al., 2012 citados en Quesada y Quizhpi.,2020)[20]. Como se plantea en los apartes geológicos e hidrogeológicos desarrollados por Terrae, en Quimsacocha las rocas tienen densidades de fracturamiento que pueden ser muy altas, lo cual deja sin piso cualquier hipótesis donde las rocas sean impermeables.

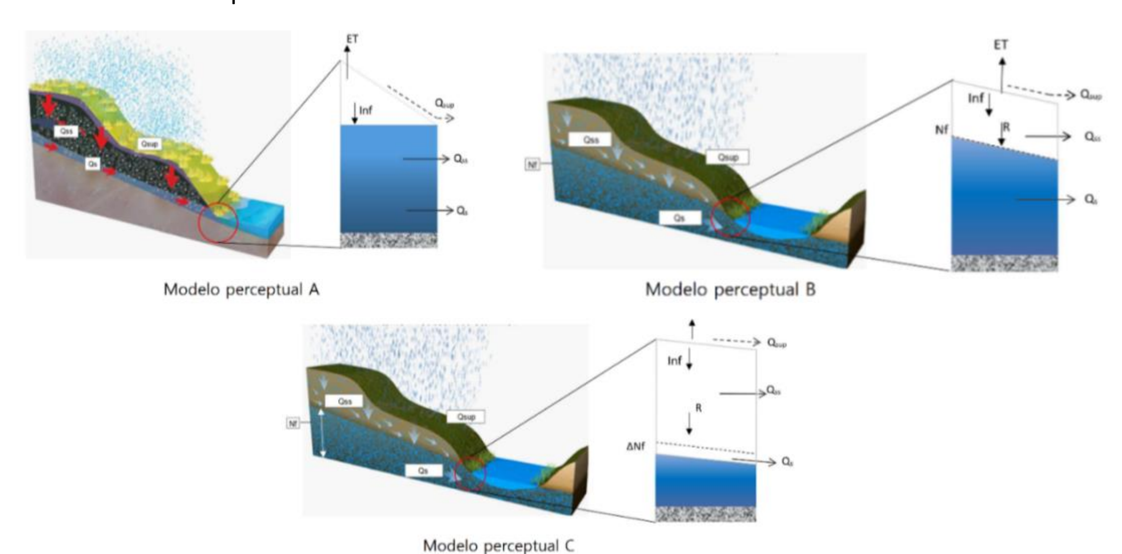


FIGURA 4. MODELOS PERCEPTUALES ENTRE ECOSISTEMA PÁRAMO Y EL VALLE ALUVIAL. FUENTE: MODIFICADO DE QUESADA Y QUIZHPI., 2020 Y GUZMÁN ET AL., 2015; THE COMET PROGRAM, 2019

Para la estimación del balance hídrico de la zona de influencia del proyecto el EsIA establece relaciones basadas en las hipótesis de estudios que plantean la condición de impermeabilidad del área de páramo:

> *"Estos bajos porcentajes de error, que comúnmente se deben a incertidumbres en las mediciones de la precipitación y las variables climáticas utilizadas para la estimación de la evapotranspiración, y que han demostrados ser significativos en los páramos del sur del Ecuador (Córdova et al., 2016; Muñoz et al., Padrón et al., 2015) indican que la contribución de agua subterránea profunda a las unidades hidrográficas de estudio es muy baja a despreciable, como se ha reportado en varias investigaciones científicas sobre la generación de escorrentía superficial en el área de estudio (Correa et al., 2019, 2017; Mosquera et al., 2016ª, 2016b)"*[21]

En el párrafo anterior citado del EsIA, página 6-282 se manifiesta que establecen como una característica particular de la mayoría de las cuencas altoandinas, la supuesta presencia de roca madre impermeable subyacente que minimiza la infiltración profunda y limita en gran medida los

[20] Quesada y Quizhpi.,2020 Análisis comparativo de la influencia del caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay en el caudal base del río Paute durante el periodo de estiaje de los años 2009 a 2011"

[21] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio. Diagnóstico Ambiental -Línea Base- A 6-282



aportes de agua subterránea, asumiendo así, que es el modelo perceptual A el que se contempla para la interpretación del páramo en las cuencas de análisis del EsIA.

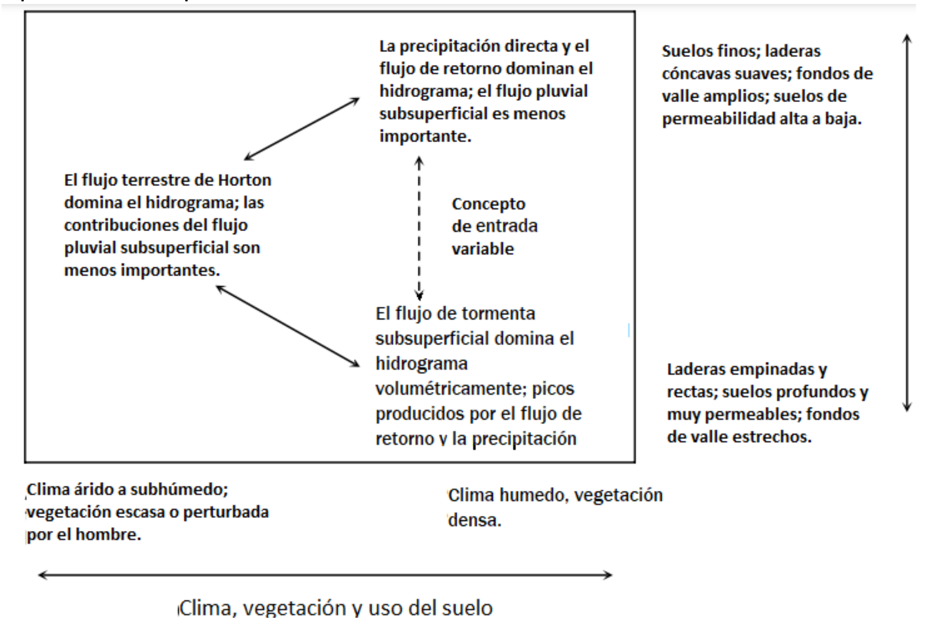


FIGURA 5. PROCESOS DOMINANTES DE LA RESPUESTA DE LAS LADERAS A LAS PRECIPITACIONES. FUENTE: TRADUCIDO DE BEVEN, K. J. (2011). CITADO COMO "SEGÚN DUNNE, 1978, CON LA AMABLE AUTORIZACIÓN DE WILEY-BLACKWELL) WILEY-BLACKWELL".

La anterior figura establece unas posibles relaciones para la selección de un modelo perceptual, en un intento por sugerir qué mecanismos pueden ser dominantes en diferentes entornos, sin embargo, según el mismo autor es necesario interpretar y entender las observaciones directas de los procesos de escorrentía en una cuenca de interés. En la figura se ejemplifican algunos criterios simplificados que han sido considerados dominantes para selección de un modelo perceptual para procesos de escorrentía en distintas condiciones de las cuencas.

La selección de un modelo perceptual tipo A para las cuencas de análisis del EsIA, estaría basada en condiciones de impermeabilidad que desconocen la existencia de fracturas en la zona de páramo. Para que se cumplan las condiciones de un flujo terrestre tipo Horton dominando el hidrograma; las contribuciones del flujo subsuperficial deben considerarse menos importantes lo cual según la anterior figura se sugiere para condiciones climáticas áridas a subhúmedas; con vegetación delgada o perturbada por los humanos, aspecto que no coincide con las ya mencionadas propiedades de almacenamiento, permeabilidad y conductividad hidráulica de los suelos caracterizados en la zona de estudio.

Por ejemplo, para otros análisis en zonas de páramo como el balance hídrico anual en la cuenca del río Jatunsacha, en los páramos de Antisana – Ecuador, en estimaciones hechas por Torres y Proaño, 2018[22] donde sí se contempla la porosidad y la existencia de una geoestructura porosa en la zona,

[22] Óp. cit. página 4

Transversal 15B No. 46 – 16 Of. 506 Tel: 340 24 62 Bogotá D.C., Colombia
info@terraegeoambiental.org

se establece un balance hídrico basado en este criterio geológico donde hasta el 61% de la precipitación se percola, como se resume en la siguiente tabla.

Tabla 2. Balance hídrico anual en la cuenca Jatunsacha

Parámetros	Valores (mm)	Porcentaje de la precipitación (%)
Precipitación	840.24	
Caudal	89.20	10.6
Evapotranspiración real	237.66	28.3
Percolación profunda	513.38	61.1

TABLA 2. BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA CUENCA JATUNSACHA. TOMADO DE TORRES ROMERO, S. F. Y PROAÑO SANTOS, C. O. 2018. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LOS PÁRAMOS DE JATUNSACHA, ECUADOR. LA GRANJA: REVISTA DE CIENCIAS DE LA VIDA. VOL. 28(2):52-66.

Lo anterior permite establecer la importancia de la caracterización del medio geológico en cualquier zona para la cuantificación de la percolación, pues en el EsIA al considerar el lecho rocoso como un manto completamente impermeable, se llegara a resultados como los presentados en el balance hídrico del informe de la empresa minera, los cuales se malinterpretan y ajustan con el fin de indicar que la cantidad de agua que entra y sale en el balance de las unidades hidrográficas a escala anual es la misma, donde para un P-Q-Eta= +-S. donde P: Precipitación, Q: Caudal, Eta: Evapotranspiración y S almacenamiento de agua que puede fluctuar entre valores positivos y negativos.

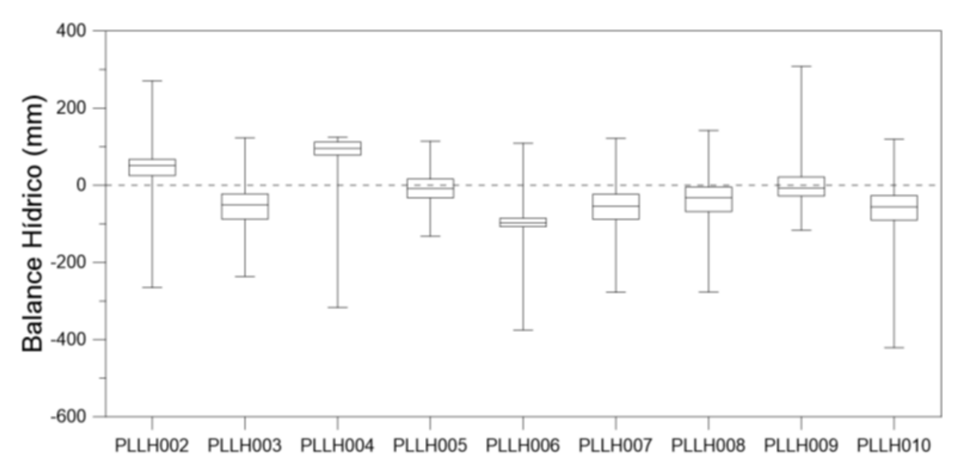


Figura 6-141 Gráfico de Cajas del Balance Hídrico Anual de las Estaciones de Monitoreo Ubicadas Dentro del PMLL

La línea entrecortada en el valor de 0 mm indica que la cantidad de agua que entra y sale de las unidades hidrográfica a escala anual es la misma.

Fuente: INV MINERALES Ecuador S. A. INVMINEC, Base de datos de monitoreo hidrometeorológico, 2006-2019; Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHICA) de la Universidad de Cuenca, Base de datos de monitoreo hidrometeorológico, 2006-2019
Elaboración: Giovanny Mosquera, Patricio Lazo, julio 2020

FIGURA 6. BALANCE HÍDRICO ANUAL DENTRO DEL PMLL TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)



A pesar de las abstracciones utilizadas en el modelo donde el lecho rocoso es considerado un medio impermeable, el delta de almacenamiento obtenido en el balance no es igual a cero, tampoco traduce inexistencia de infiltración, ni mucho menos la no existencia de relaciones estrechas entre el flujo superficial y el flujo subterráneo, pues la generación de escorrentía en laderas de montaña suele darse como una combinación compleja de Hortoniano y flujo superficial de saturación, flujo subterráneo y flujo de retorno, donde el cambio de uso de las cuencas tendrá efectos significativos en la respuesta hidrológica de la misma[23].

El análisis de la alta porosidad, y permeabilidad y la configuración del medio fracturado se establece en el capítulo de aspectos geológicos e hidrogeológicos.

1.3 Análisis de posibles afectaciones a los cuerpos de agua.

En el páramo de Quimsacocha se originan cursos de aguas superficiales de los cuales se pueden destacar 11 importantes microcuencas distribuidas en toda la región: Rircay, Zhurucay, Alumbre - Cristal, Falso, Chorro, Kalloancay-Portete, Kiwawayku-Irquis, San Agustín, Tutupali, Zhucay y Bermejos-Yanuncay que van a formar los 3 grandes ríos Rircay, Tarqui y Yanuncay, así como los ríos Minas y Chaucha, afluentes del Jubones y Gala.

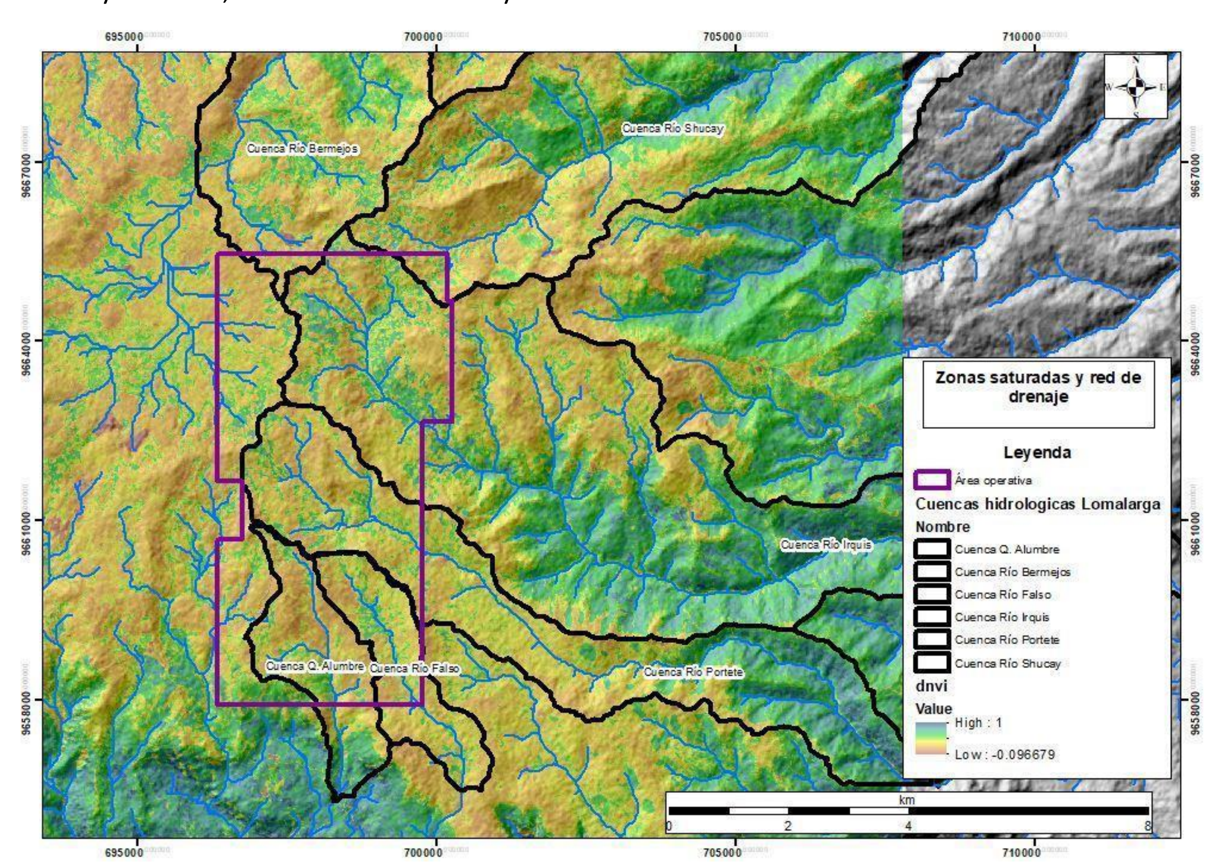


FIGURA 7. ZONAS SATURADAS Y RED DE DRENAJE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

[23] Molina, A., Govers, G., Vanacker, V., Poesen, J., Zeelmaekers, E., & Cisneros, F. (2007). Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use. *Catena*, *71*(2), 357-370.



El análisis asociado a la actividad de la vegetación (NDVI), ampliado en la sección **de "*El páramo como un gran sistema de recarga de la provincia de Azuay y sus comunidades*" del capítulo de evaluación de los aspectos geológicos e hidrogeológicos** de este informe muestra importantes zonas de saturación de agua que se ubican en las zonas coincidentes con el área de operatividad del proyecto minero Loma Larga, como se mencionó en la sección anterior en suelos con alta capacidad de infiltración superficial.

La escorrentía superficial suele ser el resultado de un mecanismo de exceso de saturación Beven, K. J. (2011)[24]. La evidencia de extensas zonas saturadas en la cuenca del río Irquis son coincidentes con las zonas de mayor densidad de drenaje.

La densidad de drenaje dada en (km/km^2) es un parámetro morfométrico de la cuenca que permite cuantificar el grado de desarrollo y la complejidad del sistema hidrográfico. Se encuentra dada por la relación entre la longitud total de los cursos de agua superficial y el área de la cuenca (Horton, 1932).[25] Se espera que a mayor densidad de drenaje los tiempos de escorrentía sean menores.

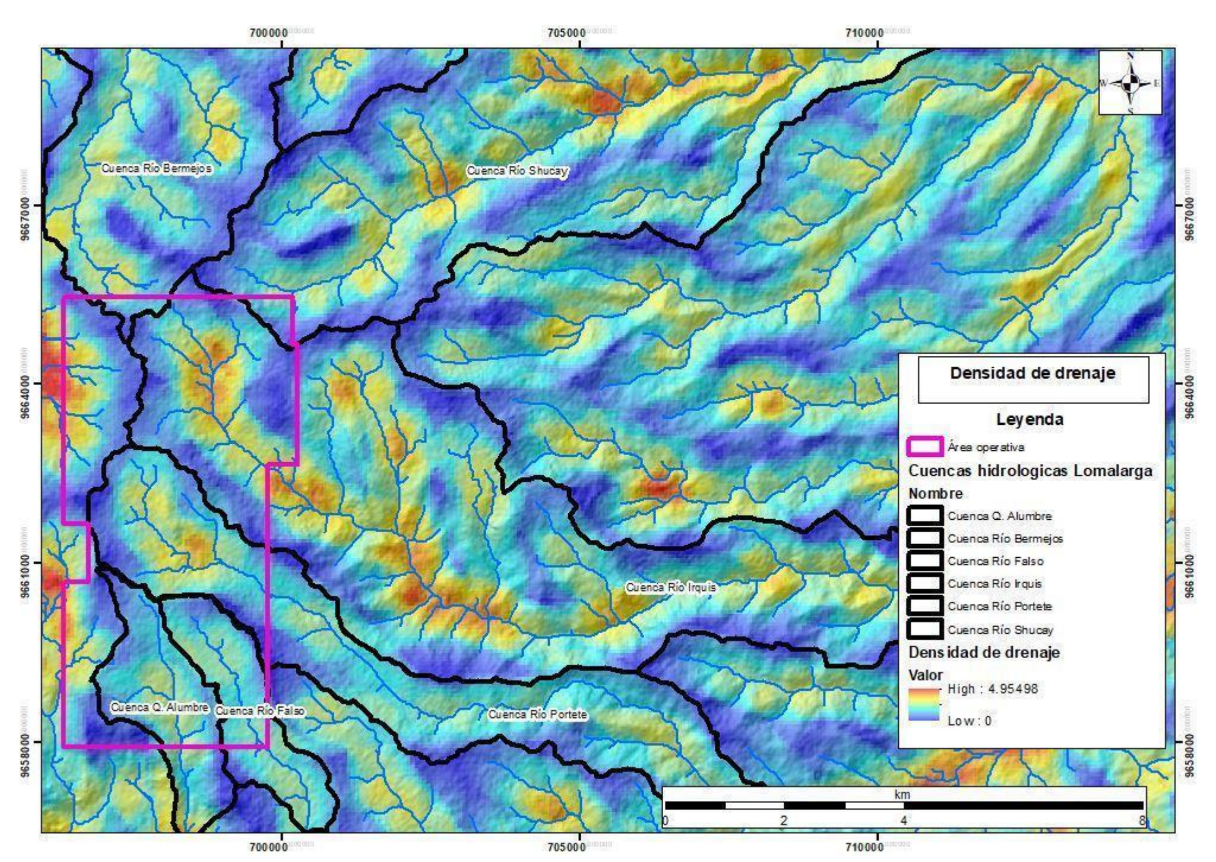


FIGURA 8. DENSIDAD DE DRENAJE (KM/KM2) EN EL ÁREA DE ESTUDIO FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

---

[24] Op Cit

[25] Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. Transactions, 13(1), 350 - 361.
Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of America. (56), 275 - 370.



El alcance del entrecruzamiento de capas de NDWI humedad asociado a la presencia de agua, la densidad de drenaje Dd y el NDVI asociado a la actividad de la vegetación elaborado para este informe evidencia visualmente que la densidad de drenaje en la zona de operatividad del proyecto es variada, no se generalizan altas densidades de drenaje para esta área en su totalidad, estas evidentemente se concentran en las zonas de los cauces principales.

Sin embargo, las zonas de humedad asociadas a la presencia de agua se distribuyen de manera casi uniforme por toda el área de operatividad del proyecto minero. Bajo lo cual se puede plantear una hipótesis de existencia de volúmenes de agua que no se escurren directamente a través de los cauces principales, si no que permanecen como colchones de agua.

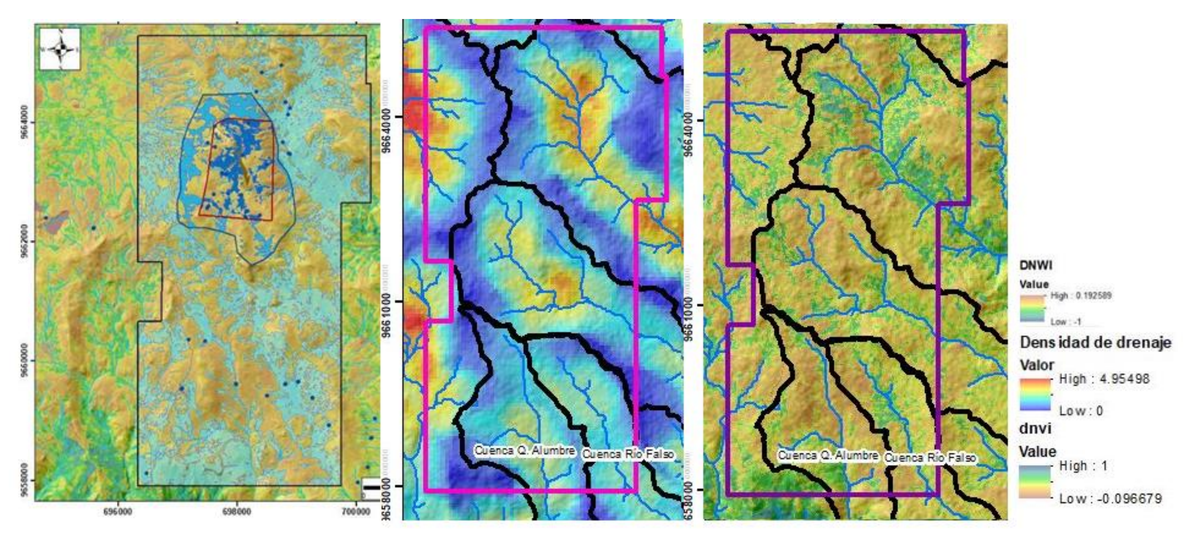


FIGURA 9. RELACIÓN VISUAL ENTRE CAPAS DE NDWI HUMEDAD ASOCIADO A LA PRESENCIA DE AGUA, LA DENSIDAD DE DRENAJE DD Y EL NDVI ASOCIADO A LA ACTIVIDAD DE LA VEGETACIÓN.

En relación con las zonas de recarga, en la Constitución de la República del Ecuador "*el articulo 314 asigna al Estado la responsabilidad de la provisión de los servicios públicos de agua potable y de riego para lo cual dispondrá que sus tarifas sean equitativas y establecerá su control y regulación. La misma norma determina que el Estado fortalecerá la gestión y funcionamiento de las iniciativas comunitarias en torno a la gestión del agua y la prestación de los servicios públicos mediante el incentivo de alianzas entre lo público y comunitario para la prestación de servicios"*

Además, que *"el artículo 411 dispone que el Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico y que regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, especialmente en las fuentes y zonas de recarga."* (subrayado fuera de texto)

Se evidencia en la siguiente figura la coincidencia de las áreas de la zona recarga hídrica establecidas **por ETAPA para los ríos Machángara, Tarqui, Tomebamba y Yanuncay establecidas por en relación con el área operativa del proyecto cuyo cruce se genera principalmente en las cuencas altas de los**



ríos Irquis y río Portete. Esta situación es suficiente para desestimar la viabilidad del proyecto minero Loma Larga. No obstante, en los apartes hidrogeológicos desarrollados por Terrae con base en el análisis de información y en el levantamiento rápido geoambiental realizado en junio de 2022 se tienen definiciones en mejor escala que comprueban la importancia del páramo de Quimsacocha como zona de recarga.

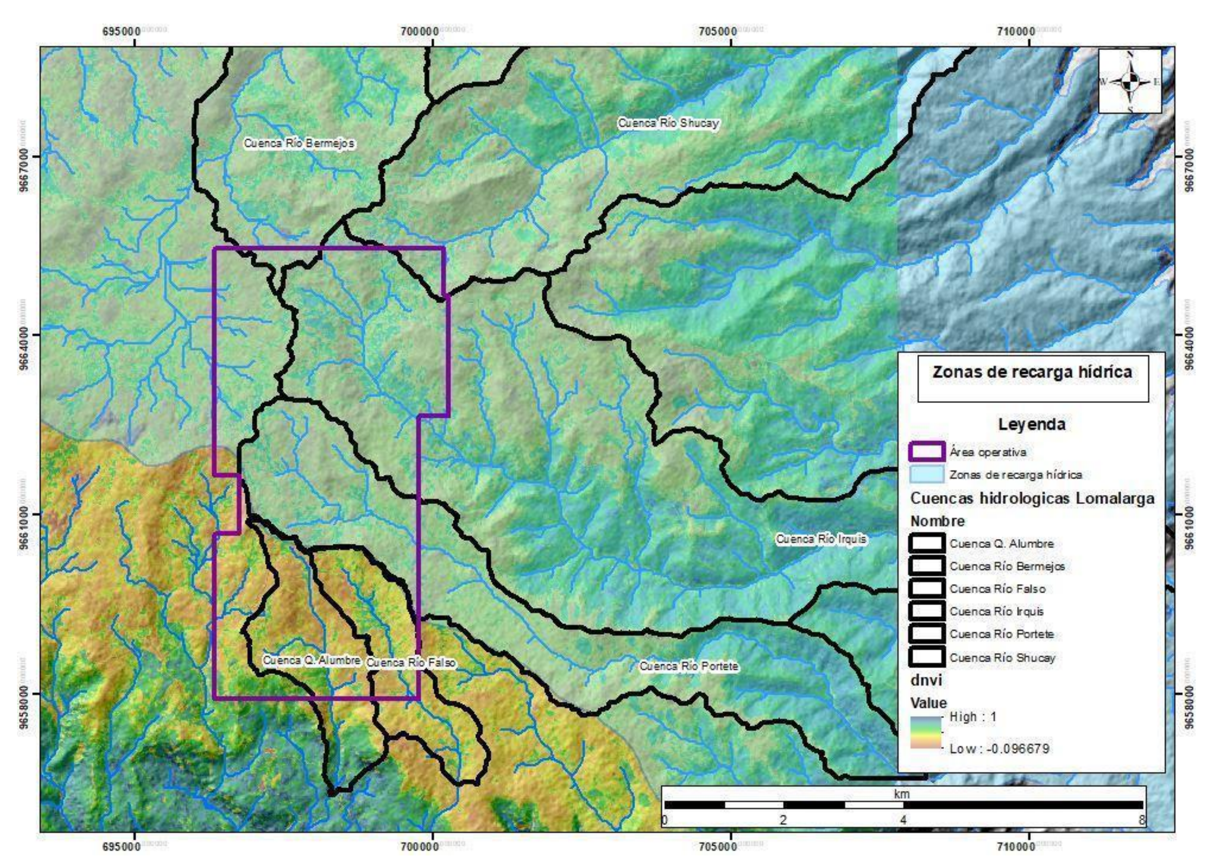


FIGURA 10. ZONAS DE RECARGA HÍDRICA EN EL ÁREA OPERATIVA DEL PROYECTO MINERO LOMA LARGA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE ETAPA.

El Plan de ordenamiento territorial (PDOT) y el Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS)[26] de cantón Cuenca señala con respecto a las áreas de recarga hídrica, que:

> *"(…) las áreas de recarga hídrica son principalmente las zonas de interés hídrico o captación de agua; reflejadas en la consulta popular por el agua del cantón Cuenca; su finalidad es la conservación de las zonas naturales y su recuperación ambiental para futuro aprovisionamiento de agua; pertenecen al nivel de uso protección o conservación". En conjunto la categoría de protección o conservación abarca el 74,93% del cantón Cuenca"*

[26] Memoria técnica de actualización de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Municipalidad de Cuenca. Dirección de Planificación. 2021 Citado en https://vocesazuayas.com/a-un-ano-de-la-consulta-popular-por-el-agua-de-cuenca-zonas-de-recarga-hidrica-delimitadas-pdot-pendiente-y-mineras-destruyen-los-páramos/#sdfootnote3anc



En el 2014, se aprobó la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, usos y aprovechamiento del agua, dado que se argumentó que no había participación de las comunidades y actores involucrados la ley fue declarada inconstitucional, en marzo de 2022 se inició un proceso prelegislativo liderado por la presidencia de Ecuador y el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica, para elaborar un nuevo proyecto de Ley de Recursos Hídricos que fue enviado a la Asamblea Nacional para su trámite.

De acuerdo con Martínez, A et al, 2021., En 2014 el propósito que tuvieron los pueblos y nacionalidades indígenas era incluir en dicha ley, junto al uso del agua, la práctica ceremonial. Este particular quedó incluido como un derecho colectivo sobre el agua, en el art. 71: "*Mantener y fortalecer su relación espiritual con el agua (…)*" Se entiende que se realizó una reforma constitucional (vía referéndum), "*en la cual se incluyó un apartado tutela de los derechos de la naturaleza y el ambiente sano, específico, que prohíbe todo tipo de minería metálica (en cualquiera de sus fases) en áreas protegidas, centros urbanos y zonas intangibles. En el caso del Proyecto Loma Larga, se encuentra contiguo al área de recreación Quimsacocha (parte del SNAP)*"[27]

De acuerdo con la simulación geográfica realizada por FIAN Ecuador y el Colectivo de Geografía Crítica del Ecuador, existen aproximadamente 670 concesiones de agua que podrían verse afectadas por la posible contaminación ambiental proveniente del proyecto minero.[28]

En cuanto a la delimitación de las zonas de páramo de acuerdo con Ortiz, D. (2003)[29] una de las variables usada en el Ecuador para la delimitación del borde límite del páramo es la cercanía a las fuentes de humedad, para la región donde se ubica el proyecto Loma Larga sobre la latitud 3° Sur, así como para los demás páramos del sur, el límite comienza en altitudes inferiores que en el resto de las zonas de páramo del Ecuador, esto se debe a que a partir de este punto la cordillera de los andes se torna más angosta y más baja, que contribuye a la fuerte compresión de las masas de aire que ascienden produciendo así una condensación y un enfriamiento más intenso y por lo tanto en un borde de páramo en altitudes menores.

El área del proyecto minero Loma Larga interseca con áreas especiales para la conservación de la biodiversidad como la Reserva de la Biósfera Macizo de las Cajas y el Área Nacional de recreación Quimsacocha, el páramo de Quimsacocha o 3 Lagunas, esta categorizado como un humedal de altura y hace parte de la Reserva de Biósfera Macizo del Cajas con una extensión de 10 226,85 hectáreas.[30] Su ubicación sobre la divisoria de las cuencas hidrográficas, la cuenca del río Jubones y la cuenca de Paute.

1.3.1. Puntos de captación

Al desarrollar la superposición de capas de uso del agua en la provincia de Azuay encontramos que la mayoría de los puntos de captación de las cuencas del río Shucay así como de las cuencas de los

---

27 Martínez-Moscoso, A., Alarcón P (2021) Tutela de los derechos de la Naturaleza y el ambiente sano, Colegio de Jurisprudencia, Universidad San Francisco de Quito

28 https://geografiacriticaecuador.org/2015/11/03/simulacion-de-afectacion-minera-en-quimsacocha/

29 Ortiz, D. (2003). Los páramos dentro del contexto ecuatoriano. Los páramos del mundo. Proyecto atlas mundial de los páramos (Hofstede R., Segarra P., Mena P., eds). Global Peatland Initiative/NC-UICN/EcoCiencia, Quito, Ecuador.

30 Torres, N., 2015. La declaratoria del macizo del cajas como reserva de la biosfera y la minería a gran escala. Posibilidades y contradicciones en el caso de Quimsacocha. Flacso, Quito.



ríos Portete, Irquis, Falso y la quebrada Alumbre son puntos de uso doméstico y de agua de riego y sistemas de distribución de agua potable.

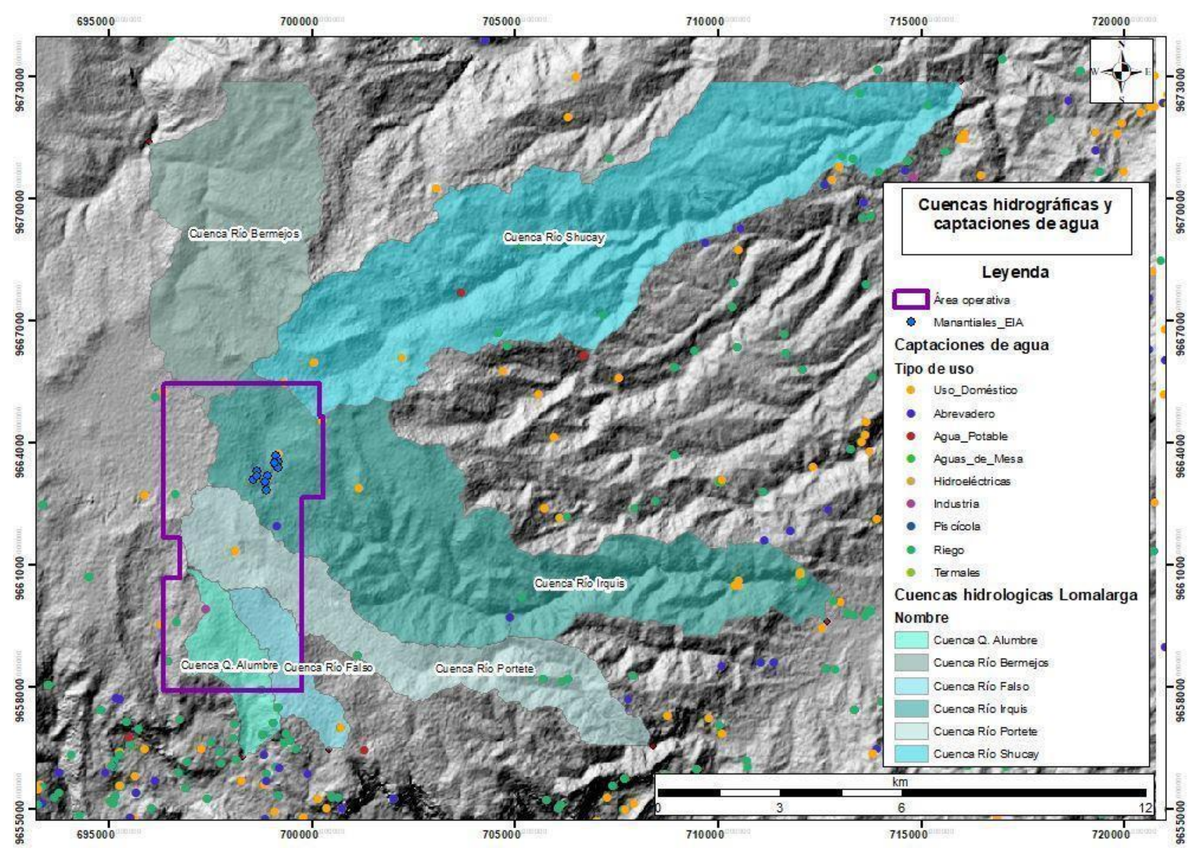


FIGURA 11. CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y CAPTACIONES DE AGUA EN RELACIÓN AL ÁREA OPERATIVA DEL PROYECTO FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE SENAGUA E INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021).

1.4 Inconsistencias en componentes del EsIA.

1.4.1. Análisis de datos hidroclimáticos.

El análisis de la climatología desarrollado en el EIA, para la realización de la línea base de clima utiliza estaciones regionales del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (ETAPA) y estaciones locales del Proyecto Minero Loma Larga (PMLL).

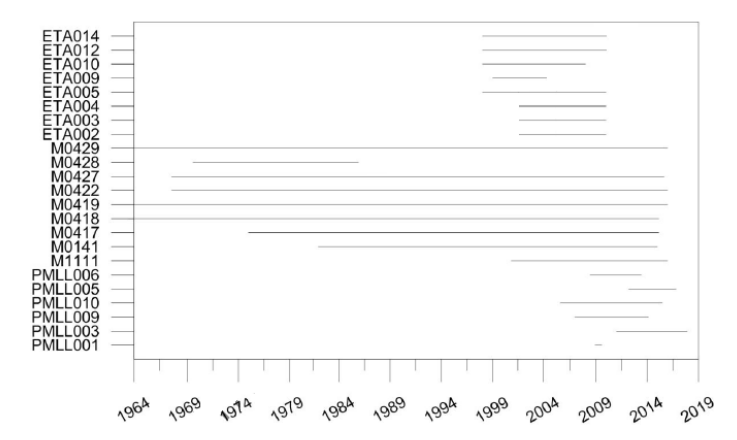


FIGURA 12. INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA EXISTENTE (1964-2019) FUENTE: MODIFICADO DE EsIA (INV METALS – CARDNO ENTRIX, 2021).

Para la climatología local, la estación de referencia utilizada en el EsIA es la estación PMLL003 – Zhurucay instalada entre desde el 2010-2011 a una altitud de 3792 y ubicada a 1,85 km de la concesión minera. La metodología utilizada para la disgregación de datos de mensuales a diarios para la variable precipitación, así como el llenado de datos diarios de las demás variables climatológicas, no es clara, dado que se está aplicando el comportamiento de la estación Zhurucay de manera general.

Para el análisis de la precipitación los datos rellenados mensualmente mediante regresiones lineales fueron a su vez disgregados a diario, utilizando una estación de referencia para realizar la disgregación de la estación objetivo para poder analizar el procedimiento es necesario revisar el *Anexo C.1.8 Ecuaciones, periodos de relleno y extensión de datos*, dado que estos datos fueron usados a su vez en el componente de hidrología superficial.

El capítulo de análisis de datos hidroclimáticos es a su vez un insumo para el cálculo de las obras de drenaje y el diseño de la presa de relaves. No obstante, se detectaron errores razón por la cual Terrae desarrolla un análisis adicional con respecto a las inconsistencias detectadas en el análisis de los datos hidroclimatológicos presentados en el EsIA en **el ítem *Aspectos relacionados a la hidrología que impactan los depósitos de relaves filtrados* sección *Componente riesgo por falla en los depósitos de relaves* de este informe.**

1.4.2. Selección de unidades hidrográficas y de estaciones de monitoreo.

El documento expone la selección de las unidades hidrográficas que cubren áreas relacionadas con necesidades del proyecto, sin embargo en el mapa presentado se evidencia que las áreas del estudio superficial (línea morada) no cubren toda el área operativa del proyecto (línea amarilla), por lo tanto muchos cuerpos de agua como las quebradas Sombrereras, El Chorro, Angaguachama y Trancahuaycu, algunas de ellas afluentes del río Portete y del río Irquis, y los ríos Cristal, Rarij, Bermejos, entre otros, no se encuentran dentro de la denominada Área de estudio superficial. Estas omisiones son graves pues dejan de lado elementos naturales fundamentales para el suministro de agua que pueden llegar a ser afectados por el proyecto.



En la figura siguiente se presentan tanto las áreas del estudio superficial como las estaciones seleccionadas para medir el monitoreo del caudal (codificadas según su ubicación con el código PLLH para las que se ubican dentro de las concesiones del proyecto minero), las estaciones de control que no tienen datos históricos y que fueron rellenadas tienen el código correspondiente a la calidad de agua. Se señalan entre el círculo naranja las estaciones cuyos datos corresponden a aforos hechos entre los meses de abril y mayo de los años 2020 y 2021 con un promedio de 60 aforos por estación. Con línea roja se señalan las estaciones cuyos datos fueron rellenados y extendidos mediante el uso de modelación en HEC-HMS, lo que indica que los datos de caudal generados para las estaciones dentro de la zona corresponden a una modelación calibrada y no a un monitoreo continuo de esta variable.

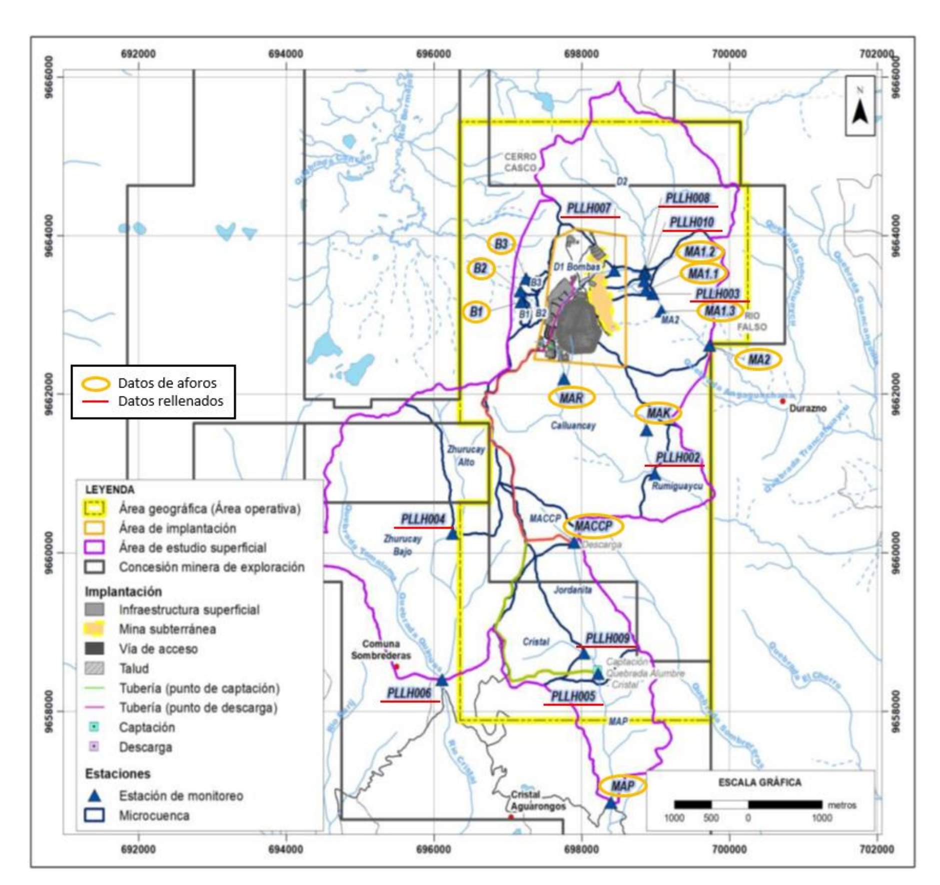


Figura 13. FIGURA DE ESTACIONES DE MONITOREO SELECCIONADAS PARA LA MEDICIÓN DEL CAUDAL DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO DEL PMLL FUENTE: MODIFICADO DE EsIA (INV METALS - CARDNO ENTRIX, 2021) PAGINA 498.

En la figura correspondiente a *Estaciones de monitoreo seleccionadas para la medición del caudal* se puede ver que las estaciones que realmente cuentan con periodos de monitoreo de varios años y con las cuales se implementó la modelación, son 5 y se encuentran ubicadas en las unidades hidrográficas Yanuncay, Tomebamba y Tarqui, de propiedad de INAMHI y se encuentran mucho más distanciadas de la zona del proyecto.



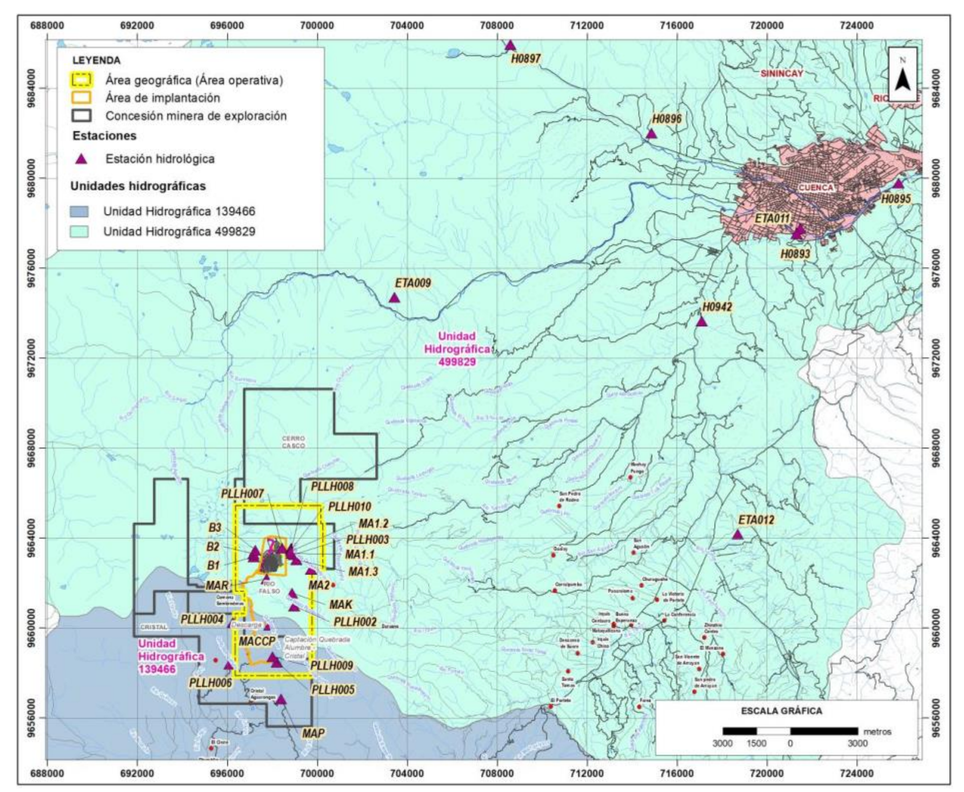


FIGURA 14. ESTACIONES DE MONITOREO SELECCIONADAS PARA LA MEDICIÓN DEL CAUDAL. FUENTE: MODIFICADO DE EsIA (INV METALS – CARDNO ENTRIX, 2021) PAGINA 500.

Las curvas de duración de caudal presentadas según los resultados que obtienen a partir del tratamiento de los datos muestran que el grupo de datos de escala regional abarca todas las curvas de duración de las unidades hidrográficas locales que se encuentran dentro del área del PMLL. En el documento se afirma que, aunque la dinámica hidrológica de las cuencas es similar, su capacidad de producción de agua puede variar debido a diferencias en sus características biofísicas y/o geomorfológicas como la cobertura, el tipo, la profundidad y la distribución de los suelos, geología, topografía. *En un escenario de cambio climático donde se espera que alrededor del 50% de la cobertura de páramo se pierda debido a las condiciones cambiantes, dado que el material orgánico reacciona sensiblemente a estos cambios de temperatura influyendo en el comportamiento hidrológico de la cuenca.* (Hofstede et al., 2014)[31]

[31] Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., & Cerra, M. (2014). Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo. UICN, Quito: Ecuador



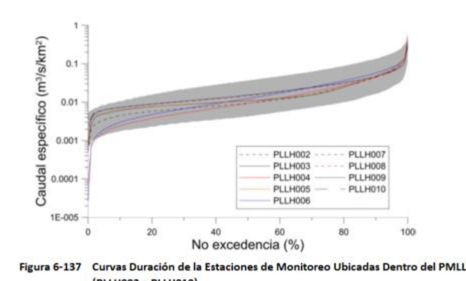


Figura 6-137 Curvas Duración de la Estaciones de Monitoreo Ubicadas Dentro del PMLL (PLLH002 a PLLH010)

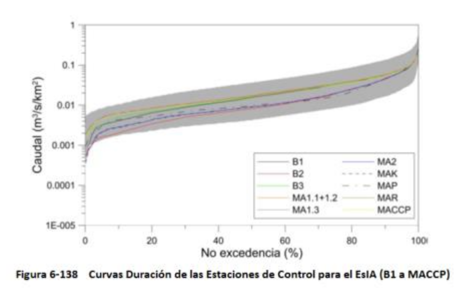


Figura 6-138 Curvas Duración de las Estaciones de Control para el EsIA (B1 a MACCP)

FIGURA 15. CURVAS DE DURACIÓN PRESENTADAS PARA LAS ESTACIONES DE MONITOREO Y LAS ESTACIONES DE CONTROL FUENTE: MODIFICADO DE EsIA (INV METALS – CARDNO ENTRIX, 2021) PAGINA 500.

Las conclusiones del estudio homogenizan la capacidad de producción y regulación de caudales en la zona categorizándola dentro en una producción de caudales moderados a bajos.

En el mismo contexto de vulnerabilidad de páramos ante cambio climático, es pertinente recoger lo consignado por el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas (Climate Change 2022 Impacts, Adaptación and Vulnerability) respecto a la exacerbación de eventos extremos, tanto sequía como lluvias torrenciales. Los páramos son fundamentales en el ciclo del agua por tanto insertar minería no es una manera responsable de adaptarse al cambio climático. Lo anterior combinado con los impactos producto del cambio de coberturas y uso de la tierra aumenta la vulnerabilidad de estos ecosistemas ante estas nuevas condiciones.

Esto ha sido más que evidente en la pérdida de los glaciares que para la cordillera de los Andes aumentado en más de un 50 %, la ocurrencia cada vez más frecuente de eventos extremos tendrá implicaciones graves sobre la disponibilidad de agua y los medios de subsistencia, así como nuevos escenarios de riesgo por deslizamientos de tierra que para el caso del proyecto minero Loma Larga debió haberse contemplado, debido a que dichos extremos pueden establecer un aumento en las condiciones de humedad de los relaves filtrados incrementando las probabilidades de falla por saturación del depósito.

1.4.3. Uso del agua ("recurso hídrico")

El documento plantea las captaciones de agua dentro del estudio en la quebrada Cristal Alumbre. Tampoco aquí se manifiesta de qué forma el uso del caudal que ahora tendrá un uso industrial afectará a las comunidades, principalmente pastores, que se benefician de los canales de riego que han construido.

Tabla 9-7 Ubicación del Punto de Captación de Agua del Proyecto

Cuerpo de Agua de Captación	Uso	Coordenadas WGS84 17 Sur		Altitud (msnm)	Caudal Disponible	Caudal Ecológico
		Este (m)	Norte (m)		(L/s)	(L/s)
Quebrada Cristal Alumbre*	Uso Industrial (minería fase de exploración avanzada)	698218	9658510	3569	8	5,535
* Quebrada Alumbre de acuerdo a la toponimia de la cartografía en formato digital del Instituto Geográfico Militar						

Fuente: Trámite Nro. DHJ-2010-18-A.P., acumulado al 6397-2009-C, 2016
Elaboración: Cardno Entrix, 2020

TABLA 3. UBICACIÓN DEL PUNTO DE CAPTACIÓN DEL PROYECTO. FUENTE: MODIFICADO DE EsIA (INV METALS - CARDNO ENTRIX, 2021) PAGINA 1546



1.4.4. Área de influencia directa respecto al componente hidrología.

Para la determinación del área de influencia de este componente señalan los siguientes criterios: Cobertura vegetal y uso actual del suelo donde el total del área de implantación de las instalaciones se encuentra sobre zonas de páramo y humedal. El área de influencia considerada establece una zona de protección hídrica de tan solo 100 metros a partir de los cuerpos de agua impactados, cuando la unidad mínima de afectación debería ser la totalidad de la microcuenca dado que los impactos generados se verán reflejados en todo el sistema. Adicionalmente, dado que no existen en el EsIA un modelamiento de flujos en un escenario de colapso de la relavera, tampoco se muestran los cuerpos de agua que podrían ser afectados.

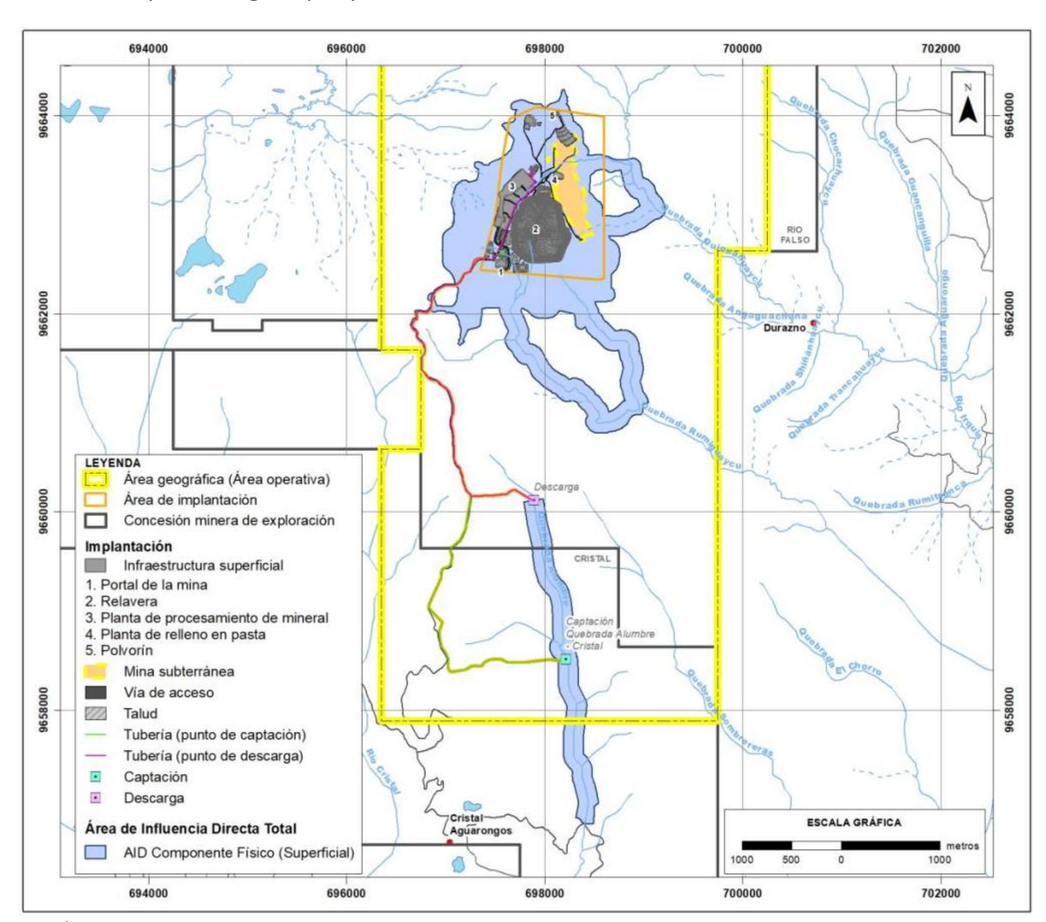


FIGURA 16. ÁREA DIRECTA SUPERFICIAL COMPONENTE FÍSICO. FUENTE: MODIFICADO DE EsIA (INV METALS - CARDNO ENTRIX, 2021) PAGINA 1546

No es comprensible por qué no se establece toda la cuenca de la quebrada Cristal Alumbre. Así como tampoco la totalidad de las cuencas de las otras quebradas cuyos cauces y afluentes se ven directamente afectados, como por ejemplo las quebradas Rumiguaycu y Quinuañuaycu, entre otras.

En la página 1518 del EIA se afirma que "(…) *únicamente se han identificado los cuerpos de agua sobre la base de las cartas topográficas del IMG a escala de trabajo de 1:50000 y su sensibilidad se*



encuentra en función de la presencia de humedales y/o almohadillas en el área de implantación del proyecto.”

También se observa que dentro de la línea base, no se realizó ningún ajuste de probabilidad de los valores máximos de precipitación con el objetivo de determinar la precipitación para eventos extremos (periodos de retorno), necesarios para el diseño de las obras de drenaje del proyecto.

Para la determinación de la línea base de los caudales presentes en los drenajes de la zona se utilizó en el EsIA el software HEC-HMS, con el que se generaron series sintéticas para el periodo comprendido entre 1964 a 2020, tomando como base los dos años de caudales observados. A partir de lo anterior, se realizó la calibración de 17 parámetros y la posterior validación del modelo. Sin embargo, **en el estudio no se presentan los valores calibrados de los parámetros, por lo cual no es posible determinar su coherencia con respecto a la zona de trabajo**.

Para determinar la bondad de ajuste de las series sintéticas con los caudales observados se utilizó el coeficiente de Nash-Sutcliffe, que, si bien se encuentra en rangos aceptables, al observar las series finales se puede determinar que **los caudales simulados son menores que los caudales observados y no representan de manera adecuada los picos que realmente ocurren en el territorio**, como se aprecia en la siguiente figura:

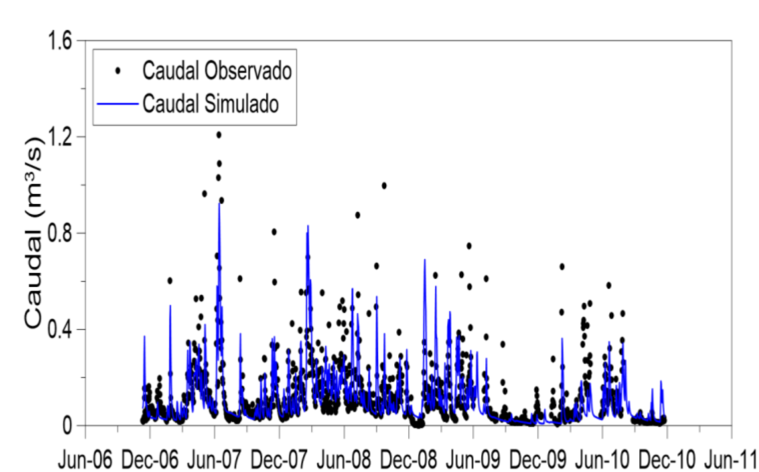


FIGURA 17. CAUDALES OBSERVADOS VS CAUDALES SIMULADOS. FUENTE: INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)

A partir de lo anterior, se puede afirmar que los caudales en la zona de estudio están siendo subestimados, especialmente lo concerniente a los caudales máximos, claves en la línea base ya que afectan los promedios mensuales de oferta hídrica en la zona, pueden llevar a considerar bajos flujos base y a subestimar la importancia de los acuíferos.

Por otra parte, en el informe se validan los resultados obtenidos a partir de las curvas de duración de caudal, comparando las estaciones de monitoreo ubicadas dentro de la zona de estudio y las estaciones de control. Se afirma dentro del informe, que los caudales en las estaciones de monitoreo son coherentes con lo observado en las estaciones de control, sin embargo, no se puede determinar la veracidad de esta afirmación ya que no se presentan los periodos de tiempo para los cuales fueron determinadas dichas curvas, que deben ser periodos de tiempo homogéneos para poder realizar dicho análisis.



Teniendo en cuenta que la construcción de la infraestructura para la explotación minera va a cambiar directamente los patrones de drenaje y coberturas del suelo, dentro del EsIA no se presenta un escenario con las obras para determinar la afectación real que se puede presentar en las fuentes hídricas aguas abajo de la explotación, en términos de caudales y regulación hídrica. Lo anterior es importante ya que el desarrollo de la explotación será realizado en zonas de páramo y humedales, ecosistemas claves para el abastecimiento de agua de la región.

Todo esto lleva a la incertidumbre y al incumplimiento del principio de precaución en lo relacionado con un material que puede amenazar vidas humanas y que además se constituye en una acumulación de residuos potencialmente tóxicos que serán emplazados para siempre en el territorio.

1.5 CONCLUSIONES HIDROLOGÍA

El comportamiento de una cuenca se resume en un modelo de entradas y salidas, la forma en cómo se percibe el funcionamiento de la misma se denomina modelo perceptual y en él se resume de qué forma opera el balance de entradas y salidas y la respuesta de la cuenca, frente a eventos como la precipitación identificando las posibles relaciones entre los elementos del ciclo hidrológico en las zonas sub y superficial del terreno de la cuenca.

La selección de un modelo perceptual donde no se contempla la permeabilidad del lecho rocoso para las áreas de páramo en las cuencas de análisis del EsIA, desconoce la existencia de fracturas en la zona de páramo. Para que se cumplan las condiciones de un flujo superficial predominante; las contribuciones del flujo subsuperficial deben considerarse menos relevantes.

Las relaciones entre la hidrología superficial y la hidrología subterránea se encuentran mediadas por las condiciones y características del suelo. En cuanto al movimiento del agua dentro del suelo, es la geología de cada lugar un condicionante importante, pues es esta presencia de permeabilidad secundaria en forma de juntas y fracturas la que puede permitir el desarrollo del movimiento de agua dentro del suelo y su posterior almacenamiento de volúmenes importantes que pueden ser efectivos para mantener los flujos base de los cuerpos de agua durante períodos de tiempo más prolongados.

A pesar de las suposiciones utilizadas en el análisis del modelo donde el lecho rocoso es considerado un medio impermeable, la diferencia de almacenamiento obtenido en el balance del ciclo hidrológico en la cuenca no debería ser considerada igual a cero, como lo hace el documento del EsIA y de ser así esto tampoco debería interpretarse como la inexistencia de infiltración, ni mucho menos la no existencia de relaciones estrechas entre el flujo superficial y el flujo subterráneo, pues la generación de escorrentía en laderas de montaña suele darse como una combinación compleja de flujo superficial, flujo superficial de saturación, flujo subterráneo y flujo de retorno, de esta manera el cambio de uso del suelo en las cuencas (como la incorporación de un proyecto minero) tendrá efectos significativos en la respuesta hidrológica de las mismas.

Aunque al cruzar las capas cartográficas con índices de humedad asociado a la presencia de agua (NDWI), las capas de densidad de drenaje (Dd) y las capas de índice de la vegetación (NDVI) elaboradas para este informe, no fue posible establecer relaciones directas cuantificables.



Visualmente, se pudo detectar que la densidad de drenaje en la zona de operatividad del proyecto es variada pues no se generalizan valores altos para esta área en su totalidad, sin embargo, las zonas de humedad asociadas a la presencia de agua se distribuyen de manera casi uniforme por toda el área de operatividad del proyecto minero. Bajo lo anterior se puede plantear una hipótesis de existencia de volúmenes de agua que no se escurren directamente a través de los cauces principales, si no que permanecen como colchones de agua.

La coincidencia de las áreas de la zona recarga hídrica establecidas por ETAPA para los ríos Machángara, Tarqui, Tomebamba y Yanuncay, en relación con el área operativa del proyecto genera coincidencias principalmente en las cuencas altas de los ríos Irquis y río Portete. Esta coincidencia entre áreas establecidas como de recarga con el área operativa del proyecto son argumento suficiente para desestimar la viabilidad del proyecto minero Loma larga.

Lo anterior se suma a la superposición de capas de uso del agua en la provincia de Azuay donde se evidencia que la mayoría de los puntos de captación de las cuencas del río Shucay como de las cuencas del río Portete, el río Irquis, el río Falso y la quebrada Alumbre son puntos de uso doméstico y de agua de riego y sistemas de distribución de agua potable, es una señal de la alarma frente a los posibles impactos que conllevaría el establecimiento de un proyecto minero en los páramos de Quimsacocha.

En cuanto al desarrollo del análisis hidrológico se cuestiona la metodología utilizada para el ajuste de los datos en escala mensual a escala diaria para la variable precipitación, así como el llenado de datos diarios de las demás variables climatológicas, no es clara, dado que se está generalizando el comportamiento de una sola estación, la estación Zhurucay, de manera equivalente para toda el área evaluada.

Para el análisis de la precipitación los datos rellenados mensualmente mediante regresiones lineales fueron a su vez disgregados o transformados a escala de datos diarios, utilizando una estación de referencia para realizar la disgregación de la estación objetivo. Las conclusiones del estudio homogenizan o igualan la capacidad de producción y regulación de caudales en las diferentes zonas de la cuenca, dándoles una categoría a todas las zonas de producción de caudales moderados a bajos.

Adicionalmente para la determinación del área de influencia de este componente señalan los siguientes criterios, cobertura vegetal y uso actual del suelo a pesar de que el total del área de implantación de las instalaciones se encuentra sobre zonas de páramo y humedal, el área de influencia establecida contempla una zona de protección hídrica de tan solo 100 metros a partir de los cuerpos de agua impactados, cuando la unidad mínima de afectación debería ser la totalidad de la microcuenca completa dado que los impactos generados se verán reflejados en todo el sistema de paramos y humedales.



2. COMPONENTE GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación de los componentes de geología e hidrogeología del Estudio de Impacto Ambiental y Plan de Manejo Ambiental (EsIA) del proyecto minero Loma Larga. En primer lugar, se establece un marco teórico de referencia abordando de manera sucinta conceptos clave de hidrogeología que son necesarios para un mejor entendimiento de los argumentos expuestos aquí, incluyendo dos temáticas muy relevantes para el caso de este proyecto minero, como son la hidrología de los páramos y los efectos que tienen las excavaciones en las aguas subterráneas.

Posteriormente, se presenta la evaluación del EsIA a través del abordaje de líneas temáticas que se consideraron fundamentales, entre las que se cuentan el modelo hidrogeológico conceptual propuesto por los autores, la conexión de las aguas subterráneas y el sistema de páramo, el análisis del modelo numérico y los riesgos de contaminación derivados de la explotación y la conformación de la relavera.

En el marco de este trabajo se tuvo la posibilidad de acceder al territorio y de adquirir información propia. Como este levantamiento de información se realizó de manera rápida (durante aproximadamente 3 días de campo), no es suficiente para plantear modelos propios de gran complejidad, pero sí para complementar, contrastar o desmentir los argumentos contenidos en el EsIA. Teniendo en cuenta lo anterior, se opta por presentar la información propia enmarcada en las líneas temáticas que se abordaron para la evaluación del EsIA y no como una sola sección descontextualizada.

2.1 Marco de referencia

Las aguas salinas de los océanos representan cerca del 97,2 % del total del agua de la tierra, y si bien el 2,8 % del agua restante corresponde a agua dulce con baja salinidad, de esta proporción el 2,14 % se encuentra atrapada en los glaciares y picos nevados, quedando 0,61 % del agua restante en reservorios de agua subterránea, y solo el 0,005 % en el agua superficial que tradicionalmente ha sido usada para abastecer las necesidades de las comunidades. (Fetter, 2018)[32].

De acuerdo con lo anterior, las aguas subterráneas representan una importante fuente de agua potable para consumo humano. así como para otras actividades. Sin embargo, su uso no fue masivo sino hasta los inicios del siglo XX, donde se presentaron diferentes desarrollos en técnicas para encontrar y extraer las aguas del subsuelo (Fitts, 2002)[33].

Con el aumento del uso de las aguas subterráneas como fuente de abastecimiento, también aumentó la investigación y estudio de la naturaleza de estas, en una rama de la ciencia conocida como la hidrogeología. Una de las primeras definiciones de hidrogeología corresponde al "estudio de la ocurrencia y movimiento de las aguas subterráneas" (Mead, 1919[34] en Nonner & Nonner, 2002)[35]. Esta definición más o menos se ha mantenido a la largo de los años, siendo complementada

---

[32] Fetter, C. W. (2018). Applied hydrogeology. Waveland Press.
[33] Fitts, C. R. (2002). Groundwater science. Elsevier.
[34] Mead, D. W. (1919). Hydrology: the fundamental basis of hydraulic engineering. McGraw-Hill Book Company.
[35] Nonner, J. C., & Nonner, J. (2002). Introduction to Hydrogeology: Unesco-IHE Delft Lecture Note Series. CRC Press



por estudios más recientes que la describen como el estudio de la ocurrencia, movimiento y química de las aguas subterráneas en su ambiente geológico (Nonner & Nonner, 2002)[36].

Algunos autores destacan la importancia de la hidrogeología como una ciencia que se encarga del estudio de los sistemas de agua subterránea con el fin de entender mejor su funcionamiento, principalmente con el objetivo de establecer medidas de control y manejo que ayuden a su conservación y protección mediante un uso responsable (Brassington, 2007[37]; Fitts, 2002[38]). lo anterior considerando las evidencias existentes de cómo diferentes actividades antrópicas han llevado a la contaminación de las aguas subterráneas en diferentes partes del mundo (Fetter, 2018)[39].

Para lograr un completo entendimiento de las aguas subterráneas, es necesario establecer relaciones con otras ciencias, entre ellas, matemáticas, física, química, geología, hidrología, meteorología y ecología, lo cual hace que muchos estudios hidrogeológicos sean resultado de trabajos de grupos interdisciplinares. Así mismo, la hidrogeología tiene un papel importante en el desarrollo de la ingeniería, principalmente en la aplicación de la ingeniería civil, hidráulica y ambiental (Nonner & Nonner, 2002).

De acuerdo con lo expuesto, es clara la importancia de las aguas subterráneas, así como la necesidad de realizar estudios completos que permitan entender su comportamiento para un correcto aprovechamiento orientado a su protección y preservación. Por lo anterior, el componente de hidrogeología es un tema clave que debe ser incluido como parte de los estudios de impacto ambiental de proyectos extractivos como Loma Larga, donde se plantean intervenciones significativas y permanentes (para siempre) que necesariamente se reflejan en afectaciones a los sistemas de agua subterránea presentes en la zona de estudio.

2.1.1. Tipos de unidades hidrogeológicas y términos generales en su estudio

Como parte del análisis de la ocurrencia y movimiento de las aguas subterráneas, la hidrogeología debe estudiar las características de los medios geológicos, ya que la naturaleza de estos, reflejada en características como la litología, la textura, la estructura y la deformación tectónica (fracturamiento y plegamiento) es la que determina en gran medida si es posible o no el almacenamiento y movimiento de las aguas en un medio (Singhal & Gupta, 2010[40]). Las unidades geológicas son clasificadas desde el punto de vista hidrogeológico en tres grandes grupos dependiendo de la facilidad con que la pueden almacenar y transmitir el agua. Estos grupos son:

- **Acuíferos**: Un acuífero es una formación natural saturada de agua que tiene espacios gracias a los cuales es capaz de almacenar y transmitir cantidades considerables de agua (Hölting & Coldewy, 2019)[41]. Los mejores acuíferos son aquellos que se encuentran compuestos de sedimentos inconsolidados de arena y grava, mientras que acuíferos de menor importancia

---

[36] Nonner, J. C., & Nonner, J. (2002). Introduction to Hydrogeology: Unesco-IHE Delft Lecture Note Series. CRC Press
[37] Brassington, R. (2007). Field hydrogeology. John Wiley & Sons.
[38] Fitts, C. R. (2002). Groundwater science. Elsevier.
[39] Fetter, C. W. (2018). Applied hydrogeology. Waveland Press.

[40] Singhal y Gupta (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer.
[41] Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2019). Hydrogeology (pp. 33-37). Springer.



pueden estar asociados a rocas ígneas y metamórficas fracturadas, o a unidades carbonatadas con cavidades en su interior (Singhal & Gupta, 2010).

- **Acuitardos**: Un acuitardo es una unidad geológica sin la suficiente proporción de vacíos en su interior como para ser considerada una fuente de abastecimiento de aguas subterráneas (Nonner & Nonner, 2002). No obstante, son formaciones que pueden funcionar para transmitir aguas entre acuíferos adyacentes, por lo cual juegan un rol representativo en la dinámica de las aguas subterráneas. Algunos ejemplos de materiales que se comportan como acuitardos son las lodolitas y arcillolitas (Singhal & Gupta, 2010).

- **Acuicludos**: Son unidades geológicas que se consideran impermeables, es decir, que el almacenamiento y flujo de aguas subterráneas no es posible a través de ellas (Nonner & Nonner, 2002)[42]. Algunos autores consideran este término como sinónimo de acuifugo, que es otra denominación ampliamente utilizada en la literatura hidrogeológica (Singhal & Gupta, 2010[43]; Hölting & Coldewy, 2019[44]). Las rocas cristalinas masivas que no presentan fracturas podrían considerarse un ejemplo de este tipo de unidad. No obstante, de acuerdo con Singhal & Gupta (2010), son unidades muy raras, ya que la mayoría de las unidades geológicas presentan diferentes tipos de vacíos o discontinuidades que permiten el paso de agua, así sea en cantidades muy pequeñas.

De los tres grupos que conforman las principales unidades de análisis de la hidrogeología, como es de esperarse, la unidad de mayor importancia son los acuíferos, ya que son capaces almacenar y transmitir una mayor cantidad de agua subterránea. También puede verse que la diferencia entre acuíferos y acuitardos es de grado y no de clase, es decir, los acuitardos se comportan de manera similar a los acuíferos permitiendo que las aguas subterráneas los recarguen y recorran (y eventualmente descarguen en acuíferos o cuerpos de agua superficial) pero a una velocidad tal que no pueden ser explotados para el consumo humano. La discusión entre el carácter extractivista de las nomenclaturas usadas en hidrogeología puede verse en Fierro & López (2014)[45]

La siguiente figura muestra la estructura típica de un acuífero junto con algunos de los diferentes términos comúnmente empleados en el estudio de las aguas subterráneas y del ciclo hidrológico. Más adelante se describe cada uno de estos términos, acogiendo principalmente las definiciones de Singhal & Gupta (2010)

[42] Nonner, J. C., & Nonner, J. (2002). Introduction to Hydrogeology: Unesco-IHE Delft Lecture Note Series. CRC Press

[43] Singhal y Gupta (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer.

[44] Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2019). Hydrogeology (pp. 33-37). Springer.

[45] Fierro, J. & López, R. (2014). Aportes a la conceptualización del daño ambiental y del pasivo ambiental por minería. En Minería en Colombia. Daños ecológicos y socio-económicos y consideraciones sobre un modelo minero alternativo, Vol 3. Bogotá: Contraloría General de la República.





FIGURA 18. TÉRMINOS COMÚNMENTE EMPLEADOS EN EL ESTUDIO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE FITTS (2002)[46].

- **Precipitación:** Es la caída de agua en la superficie como resultado de la condensación del agua de vapor que se encuentra en la atmósfera.
- **Escorrentía superficial:** Es la fracción de la precipitación que fluye por la superficie a través de diferentes rutas hasta llegar a las corrientes de agua superficial.
- **Evotranspiración**: De acuerdo con Fitts (2002) es el término se utiliza para describir los procesos de evaporación de las aguas que se encuentran cerca o en la superficie, la evaporación directa desde las plantas y la transpiración de estas. Singhal y Gupta (2010)[47] lo definen como la combinación de pérdida de agua superficial hacía la atmósfera en forma de vapor a causa de la evaporación de fuentes de agua superficial como ríos y lagunas, o por transpiración de las plantas, la cual ocurre cuando la presión de vapor del aire es menor a la de las células de sus hojas.
- **Nivel freático**: También llamado a veces la tabla de agua, nivel potenciométrico o nivel piezométrico, corresponde a la superficie que separa la zona del subsuelo que se encuentra saturada en agua del resto del sistema (Fitts, 2002). También se reconoce como la zona en donde la presión de poros del agua equivale a la presión atmosférica (Hölting & Coldewy, 2019)[48]. La profundidad de este nivel puede variar desde una distancia de pocos metros respecto a la superficie hasta cientos de metros en profundidad, como es el caso de zonas áridas con escasez de precipitaciones (Singhal & Gupta, 2010). Por otra parte, y en relación con la saturación, el nivel freático separa condiciones de oxidación – reducción, con la parte oxidada por encima y la parte reductora por debajo.
- **Zona insaturada:** Conocida comúnmente también como la zona vadosa, Nonner & Nonner (2002) la definen como la zona donde los espacios en la roca se encuentran solo parcialmente llenos de agua. En términos de presión, corresponde a la zona por encima del nivel freático en donde la presión de los poros de agua es menos a la presión atmosférica

[46] Fitts, C. R. (2002). Groundwater science. Elsevier.
[47] Singhal y Gupta (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer.
[48] Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2019). Hydrogeology (pp. 33-37). Springer.



(Fitts, 2002)[49]. Dado que parte de los poros o fracturas contienen aire, ocurren procesos de oxidación.

- **Zona saturada:** Conocida también como la zona freática, se define como la zona en donde la roca se encuentra saturada en agua, por lo que no presenta aire al interior de sus vacíos (Singhal & Gupta, 2010)[50]. En términos de presión, es la zona en donde la presión de poros del agua es mayor a la de la presión atmosférica (Fitts, 2002). Geoquímicamente es una zona donde predominan procesos reducción, pues típicamente la cantidad de oxígeno es limitada.
- **Recarga**: La recarga de aguas subterráneas es un término que hace referencia a la entrada de agua en el sistema acuífero a la altura o cerca de la altura del nivel freático (Nonner & Nonner, 2002)[51]. Fitts (2002) lo define como el flujo de aguas entre la zona insaturada y la zona saturada. De acuerdo con Nonner & Nonner (2002) puede ocurrir de diferentes formas, las dos principales son la entrada directa de aguas de precipitación o producto del flujo desde otras unidades hidrogeológicas que se encuentren en contacto con el acuífero.
- **Infiltración:** Se define como la fracción de la precipitación que es absorbida por los suelos o los cuerpos de agua, es decir la precipitación menos la cantidad de agua que se convierte en escorrentía superficial o en evapotranspiración (Singhal & Gupta, 2010). En algunos casos, las aguas infiltradas logran recargar los acuíferos (Fitts, 2002).
- **Descarga de aguas subterráneas**: Corresponde al mecanismo por el cual el sistema de aguas subterráneas libera las aguas obtenidas a través de los procesos de infiltración y recarga (Nonner & Nonner, 2002). La forma en que se descargan las aguas de un acuífero varía entre cada tipo y es un factor dependiente principalmente de las características geológicas del medio, como el tipo de unidad al que está asociado el acuífero, el medio en que se encuentra y la relación con cuerpos de agua y corrientes de agua superficial.

Para la evaluación del proyecto minero Loma Larga la relación entre aguas superficiales y aguas subterráneas cobra especial relevancia, como se expondrá más adelante. Al respecto, es necesario entender que el agua que vemos en superficie (en forma de ríos, quebradas, lagunas, entre otros) tiene una relación estrecha con el agua subterránea, y de hecho funcionan como un solo sistema hidrológico (Woessner, 2020)[52]. En la siguiente figura se ilustran los tipos de relación más común entre estos dos sistemas: que las aguas subterráneas aporten o descarguen en los cuerpos de agua superficial o que las quebradas contribuyan en la recarga de las aguas subterráneas:

[49] Fitts, C. R. (2002). Groundwater science. Elsevier.
[50] Singhal y Gupta (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer.
[51] Nonner, J. C., & Nonner, J. (2002). Introduction to Hydrogeology: Unesco-IHE Delft Lecture Note Series. CRC Press
[52] Woessner, W (2020) Groundwater – Surface Water Exchange. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2020.



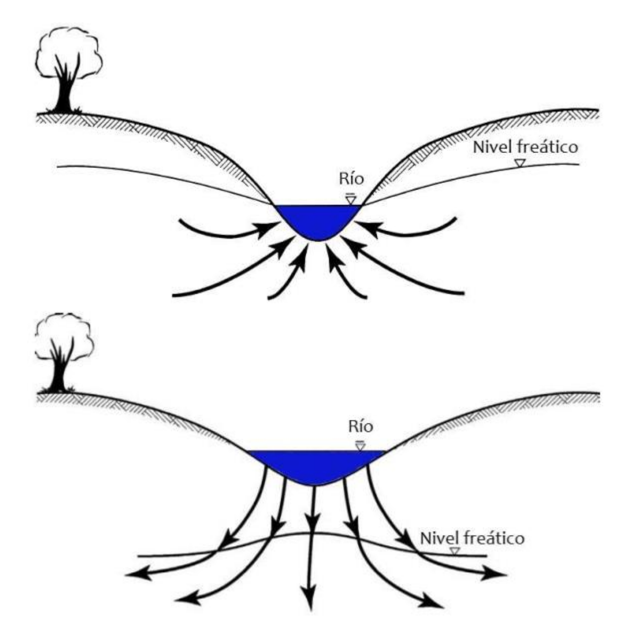


FIGURA 19. CONEXIÓN HIDRÁULICA ENTRE AGUAS SUPERFICIALES Y AGUAS SUBTERRÁNEAS. MODIFICADO DE DELLEUR (2006)[53]

Esta relación no es estática espacial ni temporalmente, pues de hecho es bastante común que en épocas hidrológicas secas el agua subterránea contribuya a mantener el caudal de las quebradas, mientras que en épocas de lluvia los cuerpos de agua superficial pueden contribuir a la recarga de acuíferos. De la misma manera, para un mismo cuerpo de agua superficial se pueden presentar tramos donde las relaciones de intercambio son diferentes.

2.1.2. Principales propiedades físicas e hidráulicas de las unidades hidrogeológicas

Teniendo en cuenta la clasificación de unidades hidrogeológicas, así como los diferentes conceptos involucrados en el estudio de las aguas subterráneas, existen algunas propiedades características de los acuíferos que permiten diferenciarlos y clasificarlos en diferentes tipos. Dichas propiedades pueden ser físicas o hidráulicas, y pueden estar asociadas tanto al agua que está almacenada como a los materiales que conforman el acuífero. Las propiedades más importantes que permiten caracterizan a un acuífero son la porosidad y conductividad hidráulica de la roca (Fitts, 2002[54]; Singhal & Gupta, 2010[55] y Hölting & Coldewy, 2019[56]). A continuación, se describe en qué consisten estas dos propiedades, y cómo se pueden clasificar los acuíferos en función de ellas:

- Porosidad

La porosidad de un medio se podría considerar la propiedad física más importante desde el punto de vista hidrogeológico, ya que más allá de la viscosidad o densidad que pueda presentar un fluido que almacena, es la porosidad la que determina que tan posible es el almacenamiento y flujo de aguas en su interior. La definición más sencilla y aceptada de porosidad la describe como el porcentaje de la roca o suelo que corresponde a espacios o poros (Fetter, 2001, Fitts, 2002, Singhal

[53] Delleur, J. W. (2006). *The handbook of groundwater engineering*. CRC press

[54] Fitts, C. R. (2002). Groundwater science. Elsevier.

[55] Singhal y Gupta (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer.

[56] Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2019). Hydrogeology (pp. 33-37). Springer.



& Gupta, 2010 y Hölting & Coldewy, 2019). La porosidad puede variar mucho dependiendo del material geológico que se esté analizando, la siguiente imagen muestra los tipos de porosidad que se pueden encontrar en diferentes materiales geológicos.

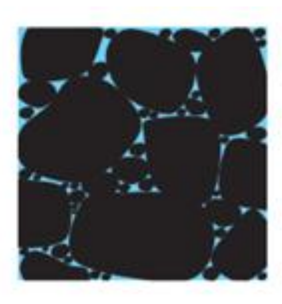
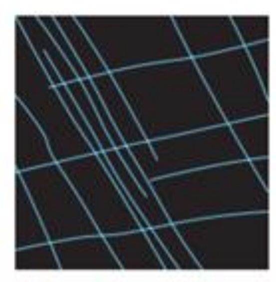
  

FIGURA 20. TIPOS DE POROSIDAD EN DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES GEOLÓGICOS. **IZQUIERDA**: POROSIDAD EN UN MATERIAL DE GRANO GRUESO BIEN SELECCIONADO, **CENTRO**: POROSIDAD EN UN MATERIAL GRANULAR MAL SELECCIONADO Y **DERECHA**: POROSIDAD ASOCIADA A FRACTURAS EN UNA ROCA CRISTALINA. FUENTE: FITTS (2002)[57].

En la figura se muestran tres ejemplos de porosidad en materiales, los dos casos de la derecha corresponden a materiales conformados por granos, uno de ellos se encuentra bien seleccionado mientras que el otro presenta una mala selección (diferencia relativa entre el tamaño medio de los granos). Se puede apreciar como la porosidad es mayor en el material que se encuentra bien seleccionado, ya que sus poros se encuentran rellenos completamente por agua, mientras que, en el material mal seleccionado, se presentan granos de material fino ocupando parte de los espacios entre los granos más grandes. La porosidad presentada en estos dos materiales se conoce como porosidad primaria, ya que está asociada a la génesis de la roca (Fetter, 2018[58]; Fitts, 2002). Porosidades como las de la imagen izquierda de la figura anterior se encuentran asociadas a acuíferos de buena calidad, mientras que las de la imagen del centro son características de unidades con un menor potencial de flujo de aguas subterráneas, como los acuitardos.

Por el contrario, la imagen de la derecha a la derecha de la figura muestra el caso de espacios en una roca maciza. La "porosidad" está asociada a fracturas que se generan posterior a la formación de la roca, por lo que se considera que su origen es secundario. No obstante, suelen jugar un papel fundamental en la conductividad y la capacidad de transmitir las aguas subterráneas, haciendo que unidades compuestas por materiales que típicamente conformarían acuitardos o acuicludos, se comporten de manera equivalente a un acuífero (Fitts, 2002; Singhal & Gupta, 2010[59]).

- Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica se podría considerar, de forma equivalente a la porosidad, la propiedad hidráulica más importante en la aplicación del estudio de las aguas subterráneas. Esta es una propiedad descrita por el ingeniero hidráulico francés Henry Darcy con base en algunos experimentos realizados en el siglo XIX (Singhal & Gupta, 2010). La definición más aceptada de la

[57] Fitts, C. R. (2002). Groundwater science. Elsevier.
[58] Fetter, C. W. (2018). Applied hydrogeology. Waveland Press.

[59] Singhal y Gupta (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer.



conductividad hidráulica la describe como la capacidad o habilidad de un material de trasmitir el agua (Fetter, 2018[60]; Fitts, 2002[61]; Singhal & Gupta, 2010[62] y Hölting & Coldewy, 2019[63]).

La conductividad hidráulica, a diferencia de la porosidad, es una propiedad que depende tanto de las propiedades del medio como del fluido que se presenta en su interior. De acuerdo con la textura del medio, unidades compuestas de granos gruesos bien seleccionados tienden a presentar conductividades hidráulicas más altas que las de materiales mal seleccionados. Para el caso de medios fracturados, es una propiedad que depende principalmente de la densidad, tamaño e interconexión de las fracturas (Singhal & Gupta, 2010).

La conductividad hidráulica es la propiedad más usada en la clasificación de unidades hidrogeológicas porque permite establecer la facilidad con la que se mueve el agua en un medio, y para el caso de proyectos extractivos, obtener predicciones sobre las afectaciones al nivel freático (como se discutirá en una sección posterior). En la siguiente imagen se aprecian los valores típicos de conductividad hidráulica de algunos materiales geológicos comunes. Para el caso del proyecto Loma Larga llama la atención como el grado de fracturamiento puede aumentar en varios órdenes de magnitud la conductividad hidráulica, como se evidencia en los valores típicos para "rocas cristalinas macizas" y "rocas cristalinas fracturadas e intemperizadas"

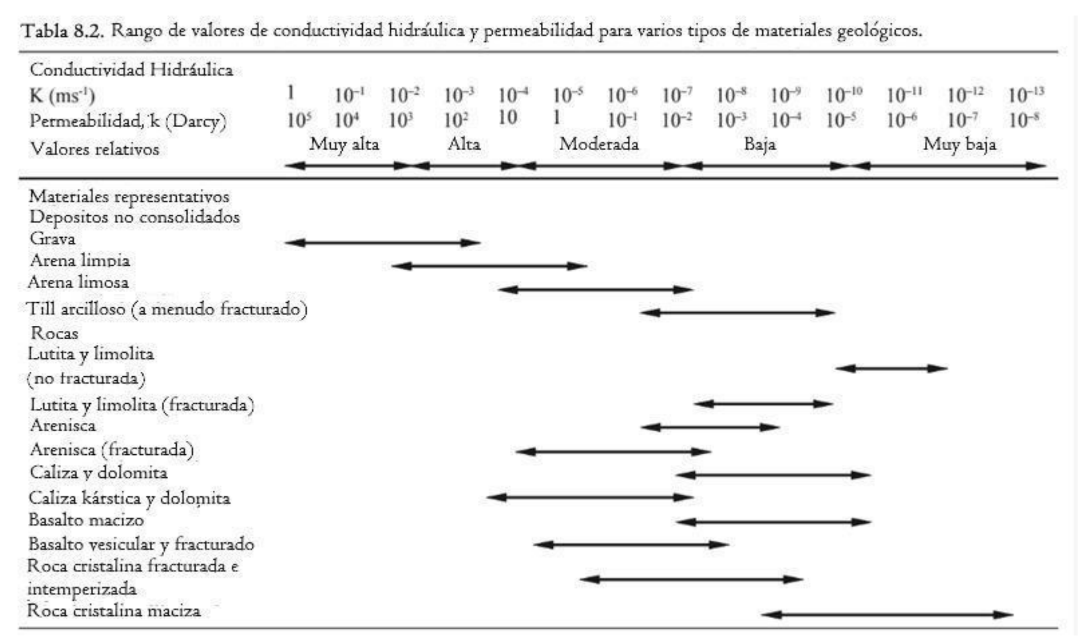


Tabla 8.2. Rango de valores de conductividad hidráulica y permeabilidad para varios tipos de materiales geológicos.

Conductividad Hidráulica														
K (ms⁻¹)	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}
Permeabilidad, k (Darcy)	10^{5}	10^{4}	10^{3}	10^{2}	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Valores relativos	Muy alta			Alta		Moderada			Baja			Muy baja		

Materiales representativos
Depositos no consolidados
Grava
Arena limpia
Arena limosa
Till arcilloso (a menudo fracturado)
Rocas
Lutita y limolita (no fracturada)
Lutita y limolita (fracturada)
Arenisca
Arenisca (fracturada)
Caliza y dolomita
Caliza kárstica y dolomita
Basalto macizo
Basalto vesicular y fracturado
Roca cristalina fracturada e intemperizada
Roca cristalina maciza

FIGURA 21. CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS PARA DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES. FUENTE: MODIFICADO DE SINGHAL & GUPTA (2010).

[60] Fetter, C. W. (2018). Applied hydrogeology. Waveland Press.

[61] Fitts, C. R. (2002). Groundwater science. Elsevier.

[62] Singhal y Gupta (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer.

[63] Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2019). Hydrogeology (pp. 33-37). Springer.



2.1.3. Tipos de acuíferos según sus propiedades

De acuerdo con las propiedades descritas en el numeral anterior, así como algunos de los términos relevantes para el estudio del agua subterránea, los acuíferos se pueden clasificar en distintos tipos, los cuales se listan a continuación:

- Acuíferos libres: También conocidos como acuíferos sin confinar, corresponden a acuíferos en donde el agua está en contacto directo con atmósfera, por lo que son principalmente acuíferos someros (Nonner & Nonner, 2002)[64], mientras que Singhal & Gupta (2010)[65] agregan que son acuíferos en donde la recarga ocurre directamente a través de la precipitación, ya que el mismo se encuentra expuesto con la superficie.
- Acuíferos confinados: También conocidos como acuíferos artesianos. Se definen como acuíferos que se encuentran cubiertos por una capa de baja permeabilidad, conocida comúnmente como capa confinante (Hölting & Coldewy, 2019) [66]. Adicionalmente, dadas las diferencias de presión a las que se encuentran sometidos, su nivel freático se encuentra a por encima del límite superior del acuífero, razón por la que en algunos casos - cuando se efectúan perforaciones para su aprovechamiento - sus aguas pueden salir a la superficie sin la ayuda de equipos de bombeo (Singhal & Gupta, 2010).

  Dependiendo del medio geológico en el que se encuentre, un acuífero confinado puede subdividirse en tres grupos diferentes, acuíferos multicapas estratiformes (asociados a rocas sedimentarias de diferentes permeabilidades intercaladas unas con otras), acuíferos fracturados (en rocas ígneas y metamórficas fracturadas), y acuíferos de cavidades (presentes en rocas solubles, principalmente la caliza (Singhal & Gupta, 2010)[67].
- Acuíferos semiconfinados: Se describen como acuíferos en los que el nivel freático no está en contacto directo con la atmósfera, pero están cubiertos por una capa que hidráulicamente se comportan como un acuitardo que permite el flujo de las aguas desde y hacia la unidad acuífera, a diferencia de los acuíferos confinados donde la capa confinante actúa como un sello más efectivo (Nonner & Nonner, 2002)[68]. Singhal y Gupta (2010) plantean que los acuíferos puramente confinados son poco comunes, y que la mayoría de estos corresponden a acuíferos semiconfinados en donde la velocidad de flujo de las aguas entre las unidades es muy lenta debido a una permeabilidad relativamente baja de las unidades adyacentes al acuífero.
- Acuíferos colgados: Los acuíferos colgados corresponden a unidades asociadas a lentes de arena que generalmente se encuentran rodeados de unidades de baja permeabilidad, principalmente materiales arcillosos. Se caracterizan por presentar reservas de aguas mucho menores que los acuíferos libres, ya que su extensión está controlada por los materiales arcillosos que los rodean (Singhal & Gupta, 2010). También se caracterizan por no estar conectados directamente con otros acuíferos (Nonner & Nonner, 2002).
- Acuífero de porosidad doble o porosidad secundaria: Son acuíferos asociados a rocas fracturadas que exhiben doble comportamiento en sus propiedades. Están compuestos

---

[64] Nonner, J. C., & Nonner, J. (2002). Introduction to Hydrogeology: Unesco-IHE Delft Lecture Note Series. CRC Press
[65] Singhal y Gupta (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer.
[66] Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2019). Hydrogeology (pp. 33-37). Springer.
[67] Singhal y Gupta (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer.
[68] Nonner, J. C., & Nonner, J. (2002). Introduction to Hydrogeology: Unesco-IHE Delft Lecture Note Series. CRC Press



por la roca matriz y las fracturas que la atraviesan. Generalmente los fragmentos de roca presentan una permeabilidad baja, mientras que las zonas fracturadas exhiben un valor mucho más alto (Singhal & Gupta, 2010).

Este último tipo de acuífero es de especial relevancia para el presente estudio, ya que como se verá más adelante, en la zona de estudio predominan rocas cristalinas fracturadas. La siguiente imagen muestra un diagrama describiendo el comportamiento general de este tipo de acuíferos:

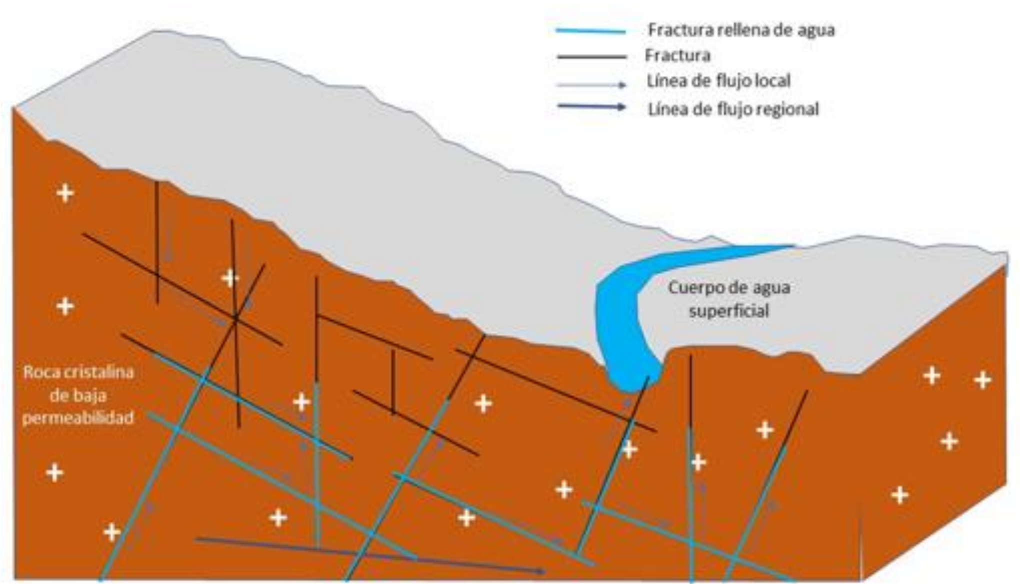


FIGURA 22. MODELO GENERAL DE UN ACUÍFERO FRACTURADO ASOCIADO A POROSIDAD SECUNDARIA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE NONNER & NONNER (2002)[69].

Como se observa en la imagen, estos acuíferos se caracterizan por presentar un nivel freático que no necesariamente coincide con alguna de las superficies de fracturas o de contactos entre materiales. Así mismo, en este tipo de acuíferos es común que se presenten distintas direcciones de flujo según sea la conectividad de las fracturas, si bien presentan una dirección de flujo general al igual que los acuíferos libres y semiconfinados asociados a rocas con porosidad primaria. También es de destacar que la recarga en estos acuíferos, a pesar de estar confinados, puede ocurrir a través de fracturas que se encuentran expuestas a la superficie

2.1.4. El páramo y las condiciones hidrológicas

La importancia de los páramos se encuentra relacionada con factores que incluyen las particularidades fisicoquímicas generadas por la altura donde se encuentran, la ubicación en la zona de confluencia intertropical, la facilidad que tienen para atrapar el agua presente en la atmósfera, las condiciones hidráulicas del suelo, y la capacidad para retener y transmitir agua, relacionada con una relación favorable entre el agua captada y el agua que necesita el ecosistema. Las condiciones

[69] Nonner, J. C., & Nonner, J. (2002). Introduction to Hydrogeology: Unesco-IHE Delft Lecture Note Series. CRC Press



hidrológicas de los páramos ecuatorianos han sido abordadas ampliamente en trabajos como el de Buytaert (2006)[70], mientras que Farfán-Duran (2016)[71] resalta los siguientes aspectos:

> *La producción de agua de un sistema páramo está entre 600 y 1.000 mm/año. Esto representa alrededor de 2/3 de la precipitación anual, que oscila entre 700 a 3.000 mm (Buytaert et al., 2006a). Estas precipitaciones son hasta un 16% más altas que en el valle interandino debido a efectos orográficos (Buytaert y Beven, 2011). Sin embargo, la aportación real de agua en el sistema hidrológico es probablemente mayor en comparación con la precipitación medida, ya que se desconoce la cantidad de agua producida por la niebla y el rocío que son interceptadas por la vegetación. Por lo general se presentan en el páramo, eventos pluviométricos que tienen una alta frecuencia y una baja intensidad, existiendo una variabilidad espacial de la precipitación; además, debido a los efectos orográficos y a los fuertes vientos. El análisis de los datos de precipitación, revelan que la variabilidad estacional en el páramo es extremadamente baja (Buytaert et al., 2006c).* ***La lluvia casi constante es el mayor contribuyente al flujo de caudal base que se mantiene durante todo el año, ya que las contribuciones de amortiguación de las aguas subterráneas profundas son limitadas o incluso inexistentes*** *(Buytaert y Beven, 2011). La evapotranspiración en el páramo es baja y oscila entre 0,8 y 1,5 mm/día (De Bièvre et al., 2012).*

Estas últimas afirmaciones son comunes en la literatura científica y replicadas por INV Metals, ya que explícitamente se habla de desconexión entre el sistema de aguas subterráneas profundas, las aguas de los páramos, y las aguas superficiales, afirmación que carece de sustento en parte por la falta de estudio de la conexión de los diferentes tipos de agua. El soporte que requiere un estudio sobre las relaciones entre los diferentes componentes del ciclo hidrológico incluye abordajes desde la geología estructural, la petrografía, la hidrogeoquímica, la isotopía, el uso de trazadores, la hidrometeorología, entre otros.

En cuanto a las condiciones hidráulicas, los suelos al encontrarse parcialmente saturados con presencia significativa de aire muestran que propiedades como la capacidad de retención juega un papel significativo. En este sentido, el comportamiento de estos suelos se puede resumir mediante curvas de retención de humedad, las cuales explican la capacidad que tienen los suelos de retener agua en función de la variación de la presión. Lo anterior se ilustra en la siguiente figura.

---

[70] Buytaert et al. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. Earth-Science Reviews 79.

[71] Farfán-Duran (2016). Impacto del cambio climático en los caudales de una cuenca de páramo. Primera aproximación. Universidad de Cuenca. Tesis para optar por el título de ingeniero Civil.



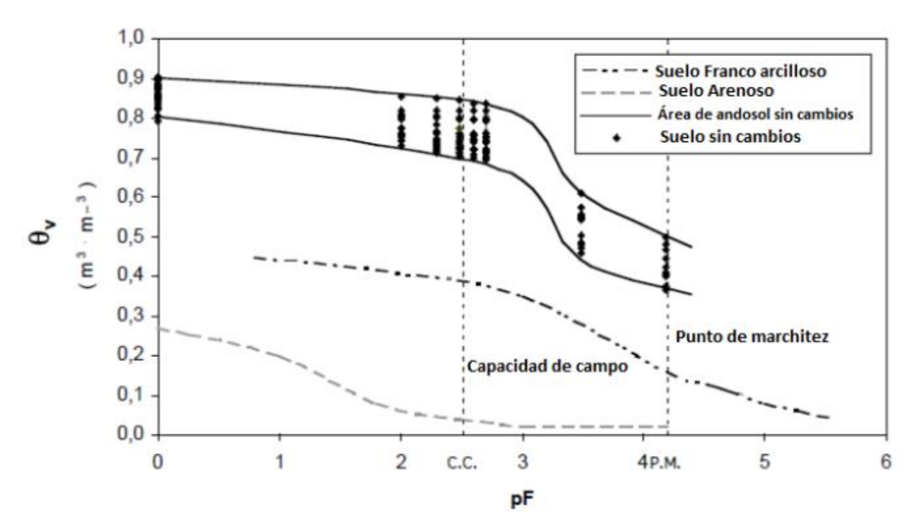


FIGURA 23. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELOS, LAS LÍNEAS CONTINUAS CORRESPONDEN A SUELOS DE PÁRAMOS. FUENTE: TOMADA DE FARFÁN-DURAN (2016) [72]

Se puede ver como los suelos asociados a los páramos tienen una capacidad de retener agua mayor en comparación con otros suelos. Adicionalmente, en cuanto a la conductividad hidráulica, se encuentran en condición saturada valores muy altos y favorables para permitir el flujo de agua (mayores a 10^{-5} m/s), sin embargo, en condiciones no saturadas se prioriza la capacidad de retención por lo que la conductividad hidráulica disminuye notablemente. Este comportamiento puede ejemplificarse como un recipiente que en lluvias muy intensas favorece la infiltración de los picos de las lluvias, y en las lluvias moderadas favorece la escorrentía superficial mientras que se recargan las aguas subterráneas. En épocas secas, se da un flujo que potencialmente alimenta aguas superficiales.

Esta ligera introducción no busca desarrollar un tratado sobre la hidrología de los páramos. No obstante, es importante anotar que en la mayor parte de las investigaciones académicas y aún más en los estudios ambientales hechos por empresas mineras, las rocas suelen ser ignoradas en su relación con el movimiento de agua. Para el EsIA de Loma Larga en particular no se encuentran menciones acerca de cómo las condiciones geológicas condicionan el comportamiento de los páramos y si eventualmente los hace susceptibles a daños por actividades relacionadas con proyectos mineros. Es de resaltar que la empresa minera considera que el sistema páramo se encuentra totalmente desligado de la roca subterránea lo cual lleva a pensar a quien evalúe el EsIA presentado que cualquier obra subterránea que se desarrolle en este ambiente no tendrá ningún efecto sobre las condiciones del páramo.

Esta situación se configura claramente como una acción de la empresa que puede llevar a decisiones sobre hipótesis no sustentadas cuyo efecto puede ser el de generar daños y pasivos ambientales a perpetuidad y a configurar faltas de motivación o falsas motivaciones de las autoridades

[72] Farfán-Duran (2016). Impacto del cambio climático en los caudales de una cuenca de páramo. Primera aproximación. Universidad de Cuenca. Tesis para optar por el título de ingeniero Civil.

ambientales. Esto es particularmente grave cuando no hay estudio suficiente sobre las zonas de recarga de acuíferos que son objetos naturales protegidos constitucionalmente en Ecuador.

2.1.5. Los efectos de las minas o excavaciones en las aguas subterráneas

La minería, tanto a cielo abierto como subterránea, genera impactos irreversibles en las aguas subterráneas, pues afectan las direcciones de movimiento, profundizan el nivel freático y, en caso de existir sulfuros en la roca, generan acidificación de aguas.

Los túneles y galerías, por tanto, atraen hacia sí todo el sistema de aguas subterráneas, generando por tanto la necesidad de desaguarlos, con lo cual las aguas subterráneas son evacuadas de manera rápida fuera del sistema. La siguiente gráfica simula la profundización del nivel de las aguas subterráneas ante una excavación para un túnel vial (los túneles y galerías mineras generan un efecto peor y más rápido por los volúmenes totales de extracción)

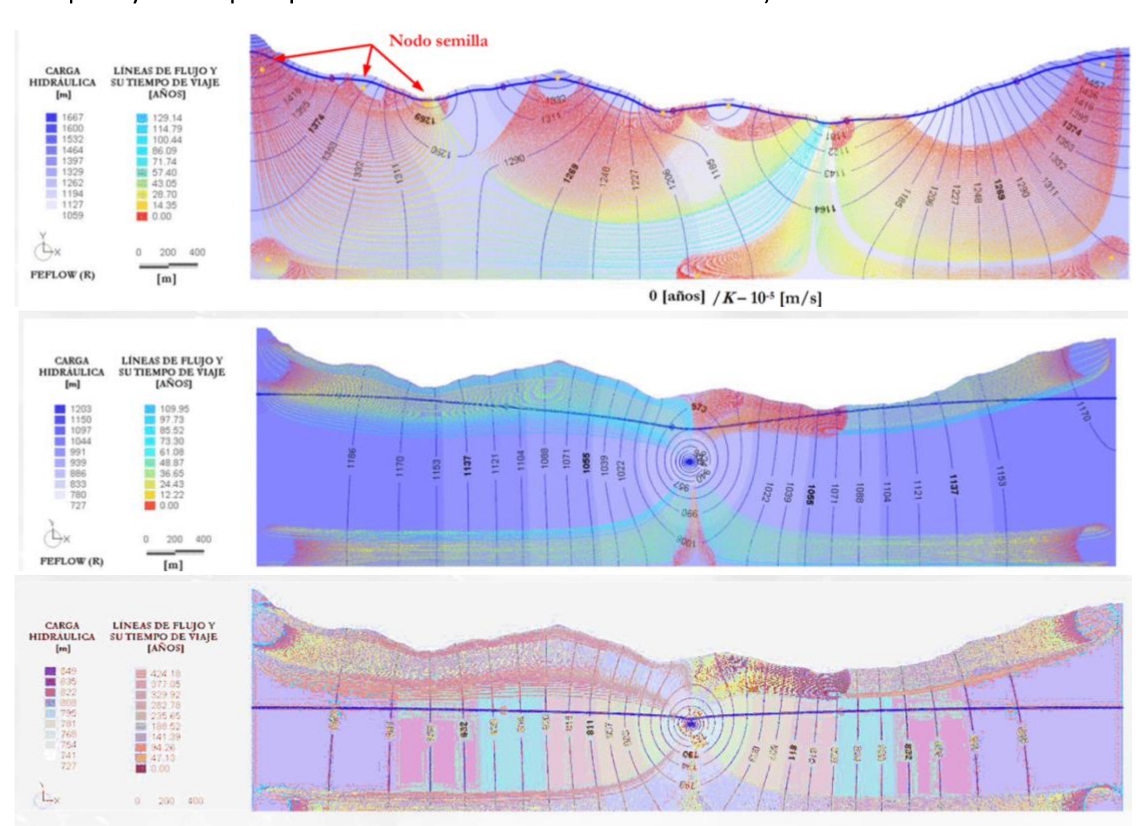


FIGURA 24. AFECTACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO (LÍNEA AZUL) POR TÚNEL VIAL EN TRES DIFERENTES MOMENTOS EN EL TIEMPO. FUENTE: TOMADA SUESCÚN CASALLAS (2016)[73]

Como se ve de la figura anterior, en el momento inicial, sin túnel, el nivel freático está cercano a la superficie; donde dicho nivel toca la superficie del terreno, se generan manantiales (ojos de agua, en el decir cotidiano de los pobladores) y las aguas subterráneas alimentan las quebradas que se

[73] Suescún Casallas, Luis Camilo, «Modelación analítica y numérica para predicción y calibración de caudales de infiltración en obras subteráneas,» Bogotá DC Colombia, 2016.



ubican en los valles. En el momento intermedio el túnel ha sido excavado y ha atraído el sistema de aguas subterráneas, generando la profundización del nivel freático, que al no tocar la superficie significa la desaparición de manantiales y la falta de aporte a las quebradas (solo quedan funcionando como cursos de agua lluvia). El momento final muestra un nivel freático profundizado incluso cientos de metros y el colapso del ciclo del agua.

Es importante anotar que además de los impactos sobre las aguas superficiales también se genera acidificación de aguas por abatimiento de los niveles freáticos si las rocas que componen las montañas contienen sulfuros.

Las aguas subterráneas, al igual que la red de tuberías en una casa, se mueven por diferencias de presión, es decir, el agua en el subsuelo se mueve de las zonas de mayor presión a las de menor presión, conformando así una red de flujo y es por ello que los túneles y galerías (en cuyas paredes la presión es mínima) atraen todo el sistema de aguas subterráneas. La presión a la que están sometidas las aguas del subsuelo depende del grado de confinamiento de las unidades geológicas y de si el agua se encuentra en contacto con la atmósfera.

Al entramado de fracturas que conforma la red de flujo configurada en el subsuelo debe agregarse la dimensión del tiempo que se encuentra asociada a la conductividad hidráulica. Esta conductividad hidráulica regula los efectos que tiene una obra sobre su entorno, particularmente, la extensión del cono de abatimiento y el tiempo al agua en moverse o discurrir a través del cuerpo de agua.

Dicha conductividad es un aspecto que debe ser analizado con rigurosidad, puesto que es una variable que un rango amplio, es decir, si bien se pueden tener unidades con velocidades del orden de 0,1 m/s (o m/d) también hay unidades en donde la velocidad puede ser del orden de 0,00000001 m/s (o m/d). A forma de comparación la diferencia en ordenes de magnitud señalada, es similar a comparar la velocidad con que un humano camina (promedio de 3 m/s o $3x10^0$ m/s) y la velocidad de la luz que es de 300.000.000 m/s (o $3x10^8$ m/s), es decir, que hay una diferencia en orden de magnitud de 8 cifras.

Esta es una de las razones por las que se deben utilizar pruebas hidráulicas adecuadas para determinar los valores representativos de conductividad del medio geológico, dado que incluso diferencias que parecen pequeñas representan cambios cruciales en los tiempos y velocidad de circulación de las aguas subterráneas. Pero no solamente son necesarias reflexiones alrededor de las incertidumbres para determinar la velocidad a la que se mueve esta agua, sino también en los impactos que las actividades humanas como la minería pueden generar en términos de la cantidad y la calidad de las aguas.

El **cono de abatimiento** es la depresión que se conforma en torno a un pozo de bombeo al tomar un caudal del acuífero. También se forman conos de abatimientos cuando excavaciones mineras a cielo abierto o túneles y galerías son más profundas que el nivel freático. Dicho cono de abatimiento depende de la magnitud de la conductividad hidráulica, lo cual se esquematiza en la siguiente figura en donde se compara la respuesta de un acuífero con baja transmisividad con uno de alta transmisividad (La transmisividad es una propiedad directamente relacionada con la conductividad



hidráulica y se define como el producto entre el valor de la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero)

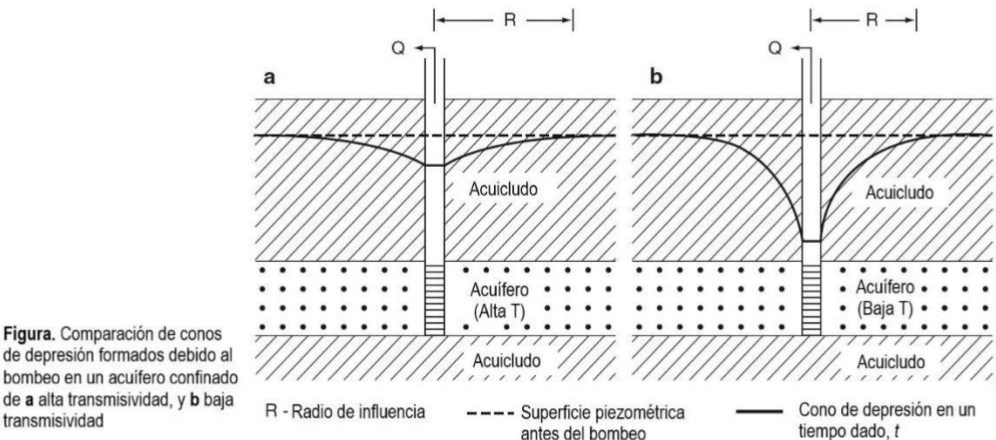


FIGURA 25. CONOS DE ABATIMIENTO E INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS. FUENTE: TOMADA DE SINGHAL Y GUPTA (2010)

En la figura anterior la línea denominada cono de abatimiento, ejemplifica cómo al extraer agua del subsuelo se generaría un descenso en la zona adyacente, es decir, si se tiene un pozo dentro de la zona de influencia del cono existe una alta probabilidad de que se seque. De igual forma si el nivel de agua subterránea se encuentra conectado con un cuerpo de agua superficial (ríos, arroyos, lagunas) se perderá el aporte de agua del subsuelo y de darse las condiciones climatológicas este efecto podría desencadenar en la desaparición de cuerpos de agua. Este último concepto es de vital importancia en zonas secas o en momentos secos puesto que en esos lugares o en esos momentos es evidente que pese a que no hay lluvias algunos ríos y arroyos siguen discurriendo.

2.2 Evaluación del Estudio de Impacto Ambiental

2.2.1. Términos de referencia

A la fecha de presentación del presente informe se hace alusión por parte de la empresa minera a la existencia de términos de referencia en el **anexo 3** del documento, esto se debe en parte a la normativa que regula este tipo de proyectos, o reglamento minero de actividades mineras. En particular el reglamento señala en el artículo 21:

> *Los estudios de impacto ambiental se realizarán en función de términos de referencia TDRs) por tipo de proyecto.*
>
> *<u>Los términos de referencia y los estudios que de ellos se deriven podrán ser realizados en conjunto cuando el proyecto integre diferentes fases como explotación, beneficio, fundición, refinación y transporte siempre que las distintas fases se realicen dentro de una misma concesión minera o proyecto y corresponda al mismo titular minero y modalidad concesional.</u>* (resaltado fuera de texto)

El titular de los derechos mineros justificará el alcance de los términos de referencia en función de su proyecto en particular. Estos serán sometidos a evaluación del Ministerio del Ambiente o la Autoridad Ambiental de Aplicación Responsable, quien podrá:

- Emitir la aprobación de los Términos de Referencia si estos cumplen satisfactoriamente con los requisitos técnicos y legales establecidos en la normativa ambiental vigente.

- Observar y solicitar al titular minero la presentación de información aclaratoria y/o complementaria, en un término de 30 días a partir de su notificación; o,

- Reformular en el caso de que éstos no sean presentados de acuerdo a la actividad que se va a desarrollar o no cumpla con los requerimientos previstos en la normativa ambiental aplicable.

A partir de la aprobación de los términos de referencia, el titular minero tendrá un plazo de 120 días, para continuar con el proceso de licenciamiento ambiental, caso contrario se procederá al archivo del trámite.

Nota: Artículo reformado por artículo 11 de Acuerdo Ministerial No. 80, publicado en Registro Oficial Suplemento 520 de 11 de junio del 2015.

Basados en estos parágrafos se puede resaltar que los términos de referencia son presentados inicialmente por la empresa minera y aprobados posteriormente por el Ministerio de Ambiente, por lo que resulta pertinente verificar lo contenido en los anexos del presente del informe presentado por la empresa minera. Adicionalmente, en el desarrollo del documento se cita y toma como referencia los siguiente términos y guías:

- Términos de referencia para la elaboración de los estudios ambientales para la fase de explotación avanzada (metálicos y no metálicos), MAE, marzo 2015.
- Guía para la presentación de la información cartográfica en términos de referencia y estudios ambientales-Categoría IV para sectores de hidrocarburos, minero y otros sectores, MAE, octubre 2015.
    - Guía técnica para definición de áreas de influencia, MAE, marzo 2015
    - Estándares de información geográfica, SENPLADES, 2013.
- Catálogo nacional de objetos geográficos, SENPLADES, 2013. Tomado de sección 4.1.1.6.2

2.2.2. La delimitación espacial del área de estudio y del área operativa del proyecto Loma Larga.

El proyecto Loma Larga está conformado por las concesiones mineras Cerro Casco, río Falso y Cristal. No obstante, la empresa minera renuncia a extensiones de área importantes dentro de estas concesiones para finalmente conformar la llamada área geográfica (operativa) del proyecto.

A partir de la revisión del EsIA es evidente que la delimitación del área operativa (que es el área objeto de licenciamiento) no responde a ningún criterio técnico, sino que simplemente está en función de la normativa contenida en la Constitución de la República del Ecuador, que a partir de una reforma implementada en 2018 establece que se prohíbe la minería metálica en todas sus fases dentro del sistema nacional de áreas protegidas (SNAP), zonas intangibles y centros poblados. Por lo anterior, no sorprende el hecho de que el área operativa esté delimitada de manera precisa para no generar ninguna intersección con el Área Nacional de Recreación Quimsacocha que hace parte del SNAP.



Aunque no exista tal intersección, la delimitación del área operativa no responde a ningún límite natural y al estar completamente adyacente a las áreas designadas para la protección, amenaza seriamente la integridad de estos lugares. Hay que recordar que los impactos no necesariamente se limitan al área inmediata de la intervención, por lo que la delimitación del área geográfica del proyecto Loma Larga es bastante deficiente desde un punto de vista ambiental y solo responde a los intereses de la empresa para cumplir con las formalidades legales. Como se verá más adelante, también existen grandes incertidumbres en los impactos potenciales que puede tener la actividad minera y debido a las grandes deficiencias del EsIA no se puede llegar a afirmar categóricamente que el proyecto no tiene el potencial de afectar las áreas del SNAP.

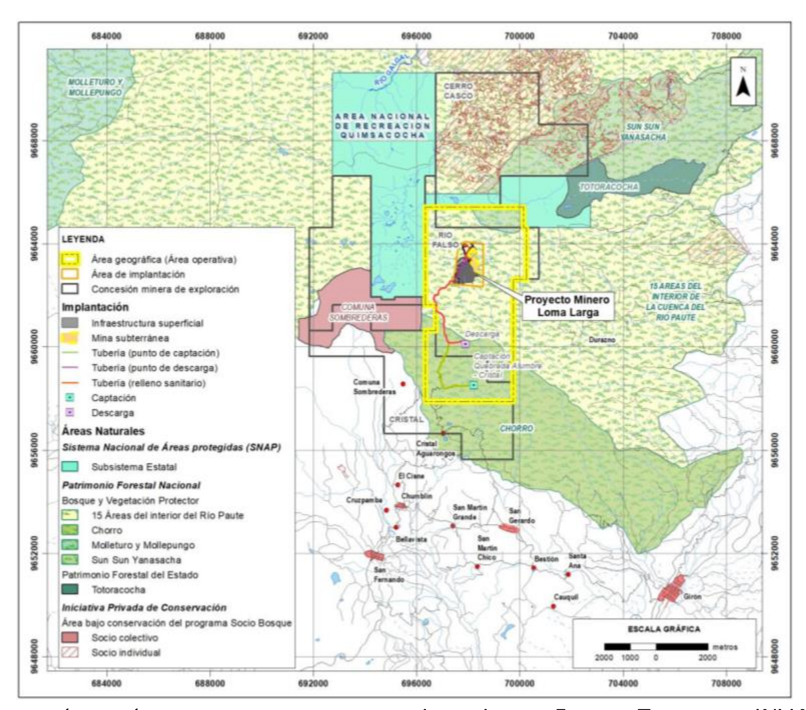


FIGURA 26. DELIMITACIÓN DEL ÁREA OPERATIVA DEL PROYECTO LOMA LARGA. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[74]

Pero además de la pobre delimitación del área operativa, también se identifican inconsistencias y falta de rigurosidad en la elección del área de estudio. Al respecto, se realiza una subdivisión entre el área de estudio de aguas superficiales (hidrología) y el área de estudio subterránea (hidrogeología) de tal forma que la primera considera algunas de las cuencas y microcuencas en el área, y la segunda se limita exclusivamente a una zona aledaña al proyecto. El contraste de estas dos áreas se puede apreciar en la siguiente figura:

[74] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



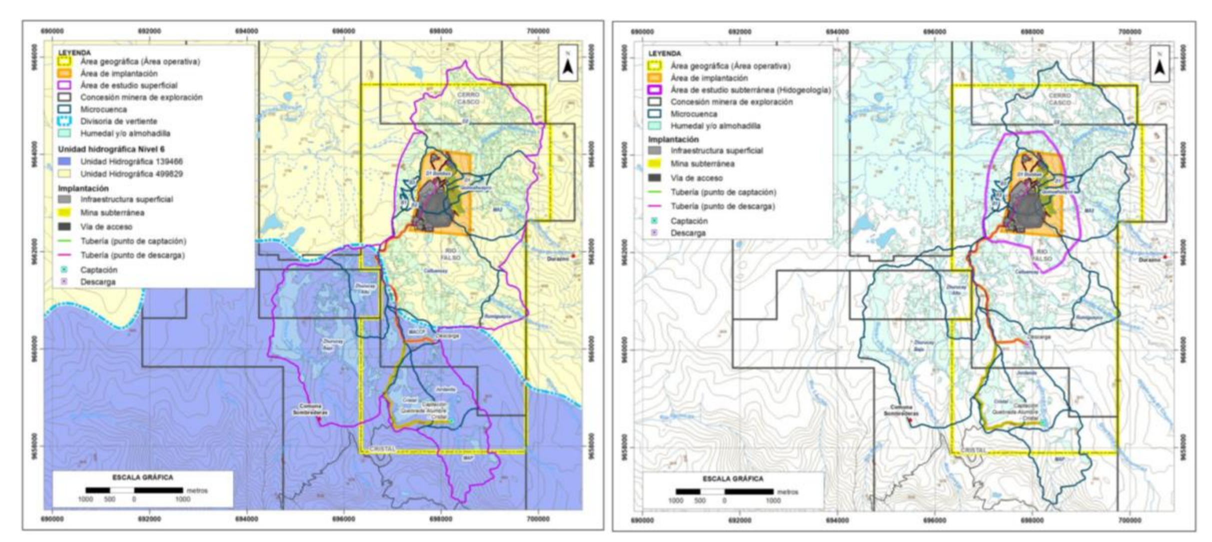


FIGURA 27. DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO HIDROLÓGICA (IZQUIERDA) E HIDROGEOLÓGICA (DERECHA). LA DELIMITACIÓN SE PRESENTA EN COLOR MORADO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[75]

Desde el punto de vista hidrológico se podría justificar en alguna medida la elección del área superficial ya que coincide con elementos naturales como las cuencas y microcuencas. Sin embargo, también es necesario establecer reparos, ya que esta área superficial está limitando la caracterización de componentes como la geología, que no se rigen por este tipo de divisorias superficiales.

Pero sin duda es la delimitación del área subterránea (hidrogeología) la que presenta mayores problemas, pues no se acoge a ningún tipo de criterio técnico. En el EsIA se menciona que el área subterránea está definida *"(...) en función de la ubicación del cuerpo mineralizado y área de implantación del proyecto Loma Larga y por los modelos de aguas subterráneas que permiten simular cambios en los sistemas hidrogeológicos (...)"* El cuerpo mineralizado y el área de implantación pueden ser significativos en términos del planeamiento minero de la empresa, pero no se constituyen en límites adecuados para evaluar los impactos ambientales sobre las aguas subterráneas. Adicionalmente, un modelo numérico de las aguas subterráneas no es un criterio eficaz para definir el área de estudio: al contrario, los límites de este modelo (que corresponden a las condiciones de contorno) deben plantearse a partir de la caracterización hidrológica, geológica y estructural de la zona, y solo eventualmente el modelo mismo (de acuerdo con los resultados preliminares) puede retroalimentar la discusión acerca de la delimitación del área de estudio. En este caso, el modelo numérico pretende delimitar el área donde se presentan los mayores abatimientos (la cual está probablemente subestimada de acuerdo con las observaciones que se presentan más adelante) como el área de estudio subterránea, lo anterior es incorrecto ya que la caracterización hidrogeológica no se debe limitar a establecer el cono de abatimiento generado por

[75] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.

la mina, sino a comprender como son las direcciones de flujo en el sector, cuáles son las características químicas del agua subterránea, en donde se encuentran las zonas de recarga, entre otros aspectos.

En relación con lo anterior, para el caso de las aguas subterráneas los conceptos más vinculantes para realizar una delimitación adecuada del área de estudio son la geología y la geomorfología, puesto que limitan la extensión de las unidades hidrogeológicas y algunas de sus propiedades, tales como la presencia de fracturas y su grado de conexión (o la porosidad de suelos y rocas sedimentarias detríticas). Dichas discontinuidades pueden aumentar significativamente la conductividad hidráulica y generar trayectorias de flujo de aguas subterráneas a un nivel regional (ver Chandra et al (2019)[76], Follin et al. (2007)[77], Singhal y Gupta (2010)[78]).

2.2.3. La caracterización geológica del EsIA

En la temática de geología en el EsIA se presenta una introducción a la geología regional indicando la provincia fisiográfica donde está ubicado el proyecto minero y recopilando información secundaria respecto a la historia geológica del sector. Más allá del uso de conceptos e ideas que no son ampliamente acogidos por la comunidad geológica como la presencia de "terrenos geológicos" en el margen occidental de Suramérica, el contexto regional es aceptable.

Sin embargo, cuando se trata de la geología local presentada por la empresa minera existen varias inconsistencias. En primer lugar, la extensión de la cartografía geológica es muy limitada, como ya se había advertido en la discusión respecto a la definición del área de estudio superficial. Lo anterior cobra mayor importancia debido a que los mismos autores resaltan la importancia de una estructura de caldera colapsada al noroccidente del área de implantación, que además está asociada al cuerpo ígneo responsable de la mineralización, el cual no queda reflejado en la cartografía.

---

[76] Chandra et al. (2019). Large scale mapping of fractures and groundwater pathways in crystalline hardrock by AEM. Nature

[77] Follin et al. (2007). Hydrogeological characterisation and modelling of deformation zones and fracture domains, Forsmark modelling stage 2.2. SKB Rapport R-07-48

[78] Singhal y Gupta (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer.



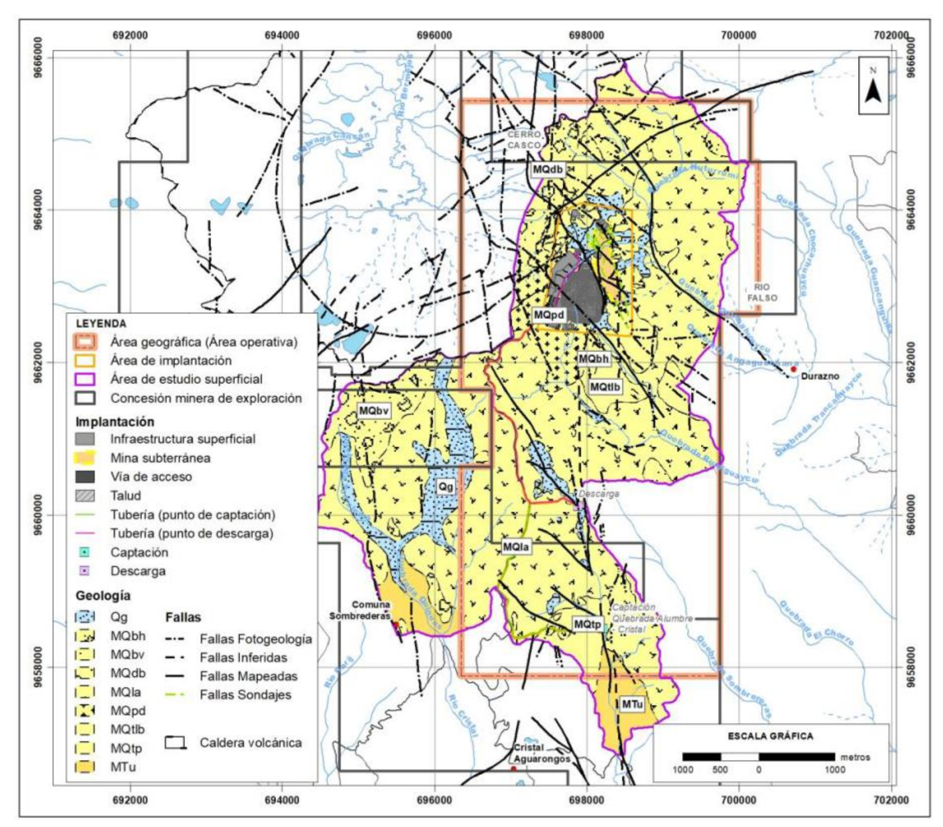


FIGURA 28. DISTRIBUCIÓN DE UNIDADES GEOLÓGICAS DENTRO DEL ÁREA OPERATIVA DEL PROYECTO LOMA LARGA. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[79]

2.2.3.1. Materiales geológicos

La extensión del área para la que se presenta la cartografía geológica cobra gran importancia en relación con el modelo numérico de las aguas subterráneas que se presenta posteriormente, pues este modelo tiene una extensión que supera ampliamente el área para el cual se realizó la caracterización de las unidades geológicas y por lo tanto genera serias dudas respecto a cómo fueron delimitadas y representadas estas unidades. A lo anterior se añade la incertidumbre generada por el hecho de que no existen cortes geológicos que muestran la geometría y relación estratigráfica de las rocas a profundidad, y particularmente como es la transición entre la Formación Quimsacocha y la Formación Turi. Hay que señalar que la única excepción se da para una pequeña área alrededor del cuerpo mineralizado, donde sí se presentan cortes geológicos.

[79] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



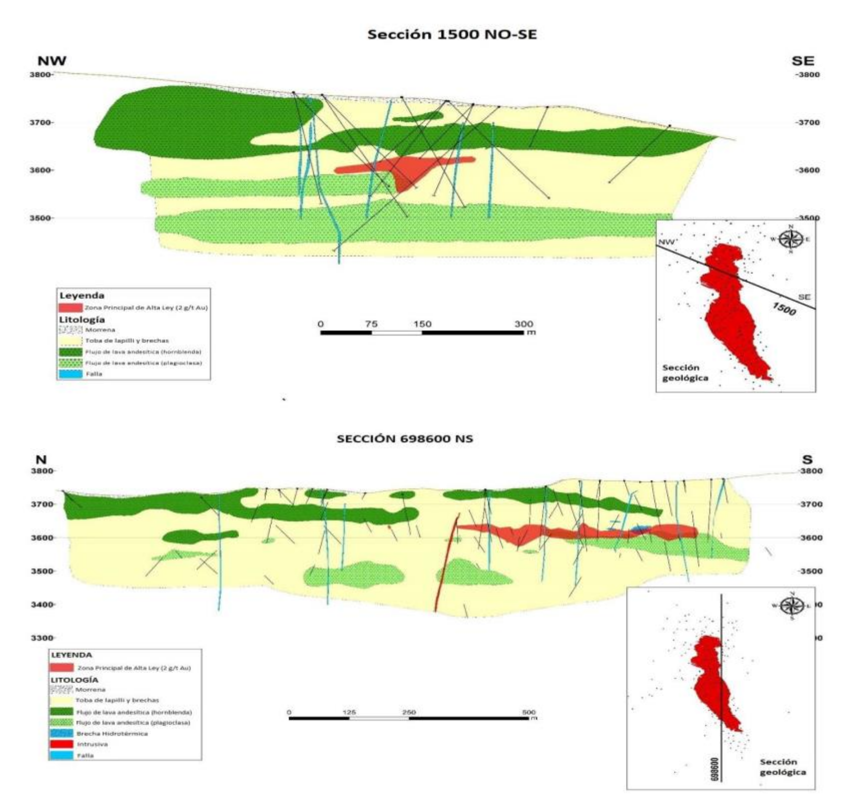


FIGURA 29. PERFILES GEOLÓGICOS REALIZADOS PARA LA FORMACIÓN QUIMSACOCHA, ILUSTRANDO LAS LITOLOGÍAS IDENTIFICADAS PARA UNA ZONA RESTRINGIDA AL ÁREA DE IMPLANTACIÓN. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[80]

Además de la presencia de estas unidades rocosas se afirma la existencia de depósitos superficiales como las morrenas, cuya presencia es consistente con el contexto geológico del área. No obstante, en la caracterización geotécnica se afirma que en el área de implantación del proyecto existen "morrenas cementadas", que no son descritas de manera detallada. Existe claramente una confusión de los autores, quienes atribuyen características derivadas del proceso de litificación a un depósito, en un contexto donde la cementación es altamente improbable. Lo anterior es preocupante porque no permite saber si la afirmación de los autores es una suposición sin soporte (ya que no hay mayor detalle sobre esta cementación) o están identificando las rocas de manera equivocada.

En relación con las litologías presentes en el área, durante la salida de campo realizada en el marco de esta evaluación se pudo identificar el predominio de rocas ígneas extrusivas, principalmente andesitas, brechas volcánicas y tobas con grado variable de fracturamiento. Sin embargo, también hay que destacar la presencia de la formación Turi, la cual aflora principalmente hacia el valle del río Irquis, se encuentra estratigráficamente debajo de la formación Quimsacocha y cuenta con características litológicas contrastantes, que a su vez se pueden reflejar en propiedades hidrogeológicas distintivas. En la siguiente figura se puede observar la distribución de esta

[80] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



formación de acuerdo con la cartografía 1:100.000 oficial de Ecuador (IIGE, 2018)[81] y la cartografía de MacDonald et al. (2012)[82] referenciada en el EsIA. Se aprecia que los dos ejercicios cartográficos son coincidentes en lo que concierne al contacto de la formación Quimsacocha y la formación Turi. Además, es evidente que la presencia de esta unidad se asocia a un cambio marcado en la geomorfología, formando escarpes y valles abruptos.

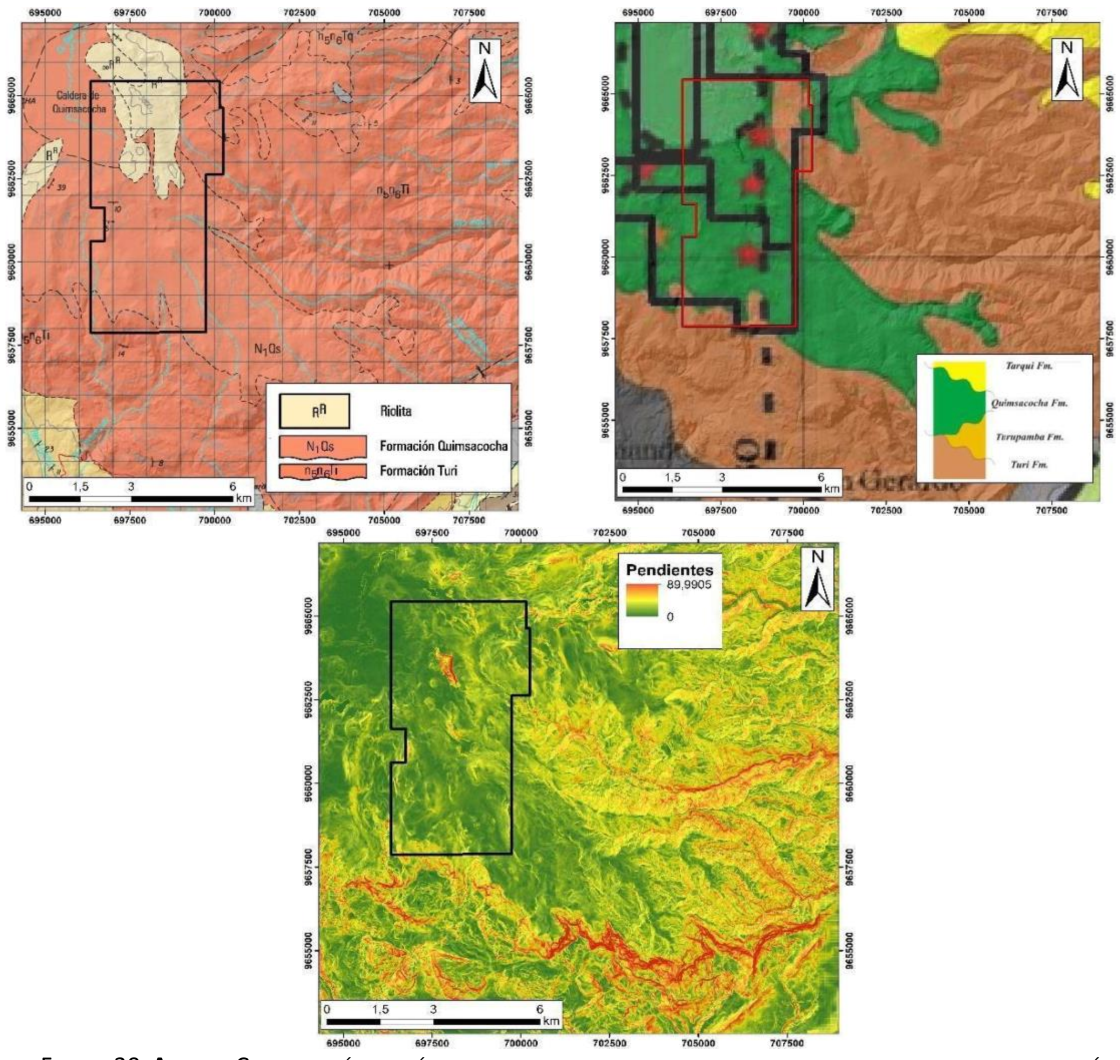


FIGURA 30. **ARRIBA:** CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE LA ZONA DE ESTUDIO, RESALTANDO EL CONTACTO DE LA FORMACIÓN QUIMSACOCHA CON LA FORMACIÓN TURI Y LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ESTA ÚLTIMA: FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE IGGE (2018) Y MCDONALD ET AL. (2012) **ABAJO**. CAMBIOS EN LAS PENDIENTES PREDOMINANTES ASOCIADOS AL AFLORAMIENTO DE LA FORMACIÓN TURI. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Se resalta la importancia de la formación Turi debido a su extensión superficial, su litología consistente en conglomerados de clastos andesíticos que alternan con niveles de arenitas y rocas

---

81 Instituto de Investigación Geológico y Energético – IIGE (2018) *Hoja Geológica Girón. Escala 1:100.000*

82 MacDonald, P.J., Bissig, T., Hart, C.J.R., Barreno, J., Viera, F., Mantilla, G., and Rogers, J. (2012). Evolución hidrotermal de la falla Río Falso, Distrito Au-Ag-Cu de alta sulfidación de Quimsacocha, Provincia de Azuay, Ecuador. Presentado a la conferencia SEG, Lima, Perú, septiembre de 2012.

volcánicas extrusivas (confiriéndole una permeabilidad por porosidad primaria) (Senagua – ESPOL TECH, 2014)[83] y su configuración geomorfológica abrupta, que como se verá más adelante se asocia a la ocurrencia de manantiales relacionados directamente con la roca. A pesar de estas características sumamente relevantes, esta formación es subestimada dentro del modelo hidrogeológico conceptual. Adicionalmente, como se verá en la sección de análisis del modelo numérico de las aguas subterráneas, no hay pruebas hidráulicas sobre esta litología, generando grandes incertidumbres sobre la conductividad hidráulica que le fue asignada.

2.2.3.2. Deformación tectónica de los materiales geológicos

Además de las omisiones y deficiencias en la caracterización de los materiales geológicos, también existen omisiones en lo referente al aspecto de cómo están fracturadas las rocas. En general, las fracturas son una respuesta a los esfuerzos tectónicos que operan en un territorio; dichos esfuerzos pueden ser compresivos, tensionales o de transcurrencia y de manera común, son esfuerzos complejos que combinan las características anotadas y se convierten entonces en transtensionales o transpresionales.

Lo anterior parece alejado del ciclo del agua, pero hay un aspecto fundamental en la relación entre los esfuerzos tectónicos y el agua subterránea y es que le definen a esas aguas las posibilidades de movimiento, el volumen de agua y su dirección más probable. La relación entre aguas y fracturas es total cuando las rocas son ígneas, como es el caso del páramo de Quimsacocha. Por esa razón, es fundamental el entendimiento de los esfuerzos tectónicos, de la deformación que éstos generan en las rocas y de aspectos consiguientes de tipos de fallas geológicas y disposición estructural de las fracturas.

En lo referente al tema de geología estructural (esfuerzos y deformaciones tectónicas en las rocas), se puede afirmar que la caracterización estructural de las unidades geológicas es completamente deficiente. Los autores del estudio no tienen ningún tipo de certidumbre respecto a los rasgos estructurales de la zona, utilizando de manera frecuente el modo gramatical condicional o expresiones como "*al parecer*" para referirse a la cinemática de las fallas geológicas presentes en el área. Incluso llegan a definir el carácter normal de la falla Río Falso con argumentos tan débiles como el de que *"(...) las perforaciones realizadas no cortan más de una zona de las mismas características en cada sondaje (...)",* cuando este no es un criterio que necesariamente indique la presencia de una falla, pues por un lado se encuentra en un entorno dominado por rocas ígneas volcánicas donde las relaciones estratigráficas pueden ser bastante complejas y por otro lado parece existir un campo de esfuerzos casi transcurrente puro, de acuerdo con datos preliminares levantados por Terrae en su levantamiento geoambiental rápido de junio de 2022 (ver numeral 2.3).

[83] Senagua – Empresa Pública ESPOL TECH. Mapa hidrogeológico de Ecuador. Escala 1: 1´000.000



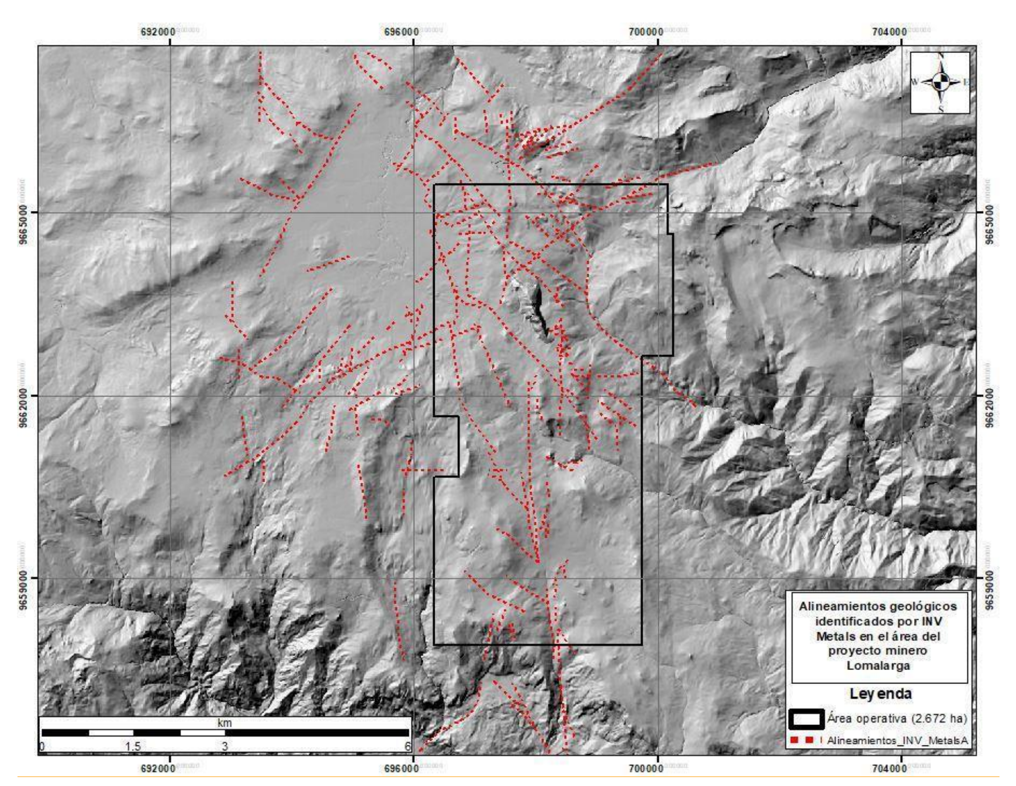


FIGURA 31. ALINEAMIENTOS GEOLÓGICOS Y FALLAS INFERIDAS EN EL EsIA. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[84] Y PLASMADO EN MODELO DIGITAL DEL TERRENO.

En el EsIA definen tres familias de fracturas geológicas en las rocas sin anexar los datos de soporte que justifican su existencia, lo cual es fundamental dado que se entiende que un grupo o familia de rasgos estructurales debe estar definido por una gran cantidad de datos individuales que confirman una tendencia. Los grupos identificados en el estudio son *"20-30/70-80"*, *"315-340/80-85"* y de *"135° a 150° con buzamiento de 4°-20°".* Este aspecto genera incertidumbres muy importantes, pues el flujo de las aguas subterráneas está dominado por la interacción de las fracturas, particularmente en el tipo de rocas que afloran en el área del proyecto minero.

El EsIA contiene errores tan básicos como usar de manera confusa los sistemas de notación para datos estructurales. El grupo *"20-30/70-80"* no es válido bajo ninguna regla de notación, mientras que el grupo *"315-340/80-85"* es válido bajo al menos dos sistemas como son dirección de inclinación/inclinación o la regla de la mano derecha, sin que sea posible determinar con certidumbre cuál es la dirección correcta porque no existe ninguna imagen de apoyo que ilustre estas direcciones y porque a lo largo del texto se utilizan de manera indistinta múltiples sistemas de notación. Considerando lo anterior, es imposible para el lector llegar a conceptualizar las direcciones descritas, lo que sumado a la carencia total de datos estructurales se constituye en una omisión grave que tiene implicaciones en la temática de flujo en medio fracturado, que debería ser central en la caracterización hidrogeológica.

[84] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



Hay que mencionar que en apartados posteriores del texto sí se reportan datos estructurales para un área muy cercana al cuerpo mineralizado, estos datos tienen que ver con 10 pozos orientados que suman un total de perforación de 1896 metros. De acuerdo con los autores del estudio, durante esta longitud de perforación se identificaron al menos 3870 entidades, lo que da una relación de 2,04 discontinuidades/metro para este sector, lo que en otras palabras está describiendo un altísimo fracturamiento de los macizos rocosos y por tanto su carácter de acuíferos por fractura.

No obstante, lo anterior, el EsIA no aborda este aspecto fundamental con la generación de datos que permitan dar cuenta de la conexión entre las fracturas y las implicaciones para el flujo de agua subterránea. De acuerdo con los diagramas de polos (casi ilegibles) parece existir un alto predominio de fracturas con inclinación cercana a la vertical, lo cual podría favorecer los procesos de recarga de acuíferos profundos y dado el caso iría en contravía de algunos supuestos planteados en la caracterización hidrológica e hidrogeológica, como la desconexión entre el páramo y las aguas subterráneas profundas.

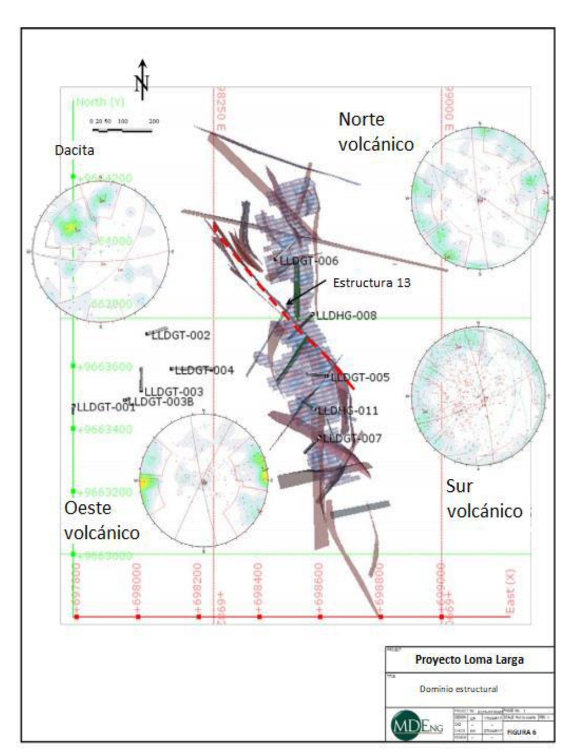


FIGURA 32. DIAGRAMAS POLOS DE DISCONTINUIDADES MEDIDAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO POR LOS AUTORES DEL EsIA. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[85]

2.2.4. *La presencia de azufre, cobre y arsénico en suelos*

En el EsIA se realiza una caracterización de los suelos en virtud de sus características hidrofísicas, químicas y de fertilidad. Para tal propósito se presentan análisis realizados en 13 puntos de monitoreo cuya distribución es la siguiente:

---

[85] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.

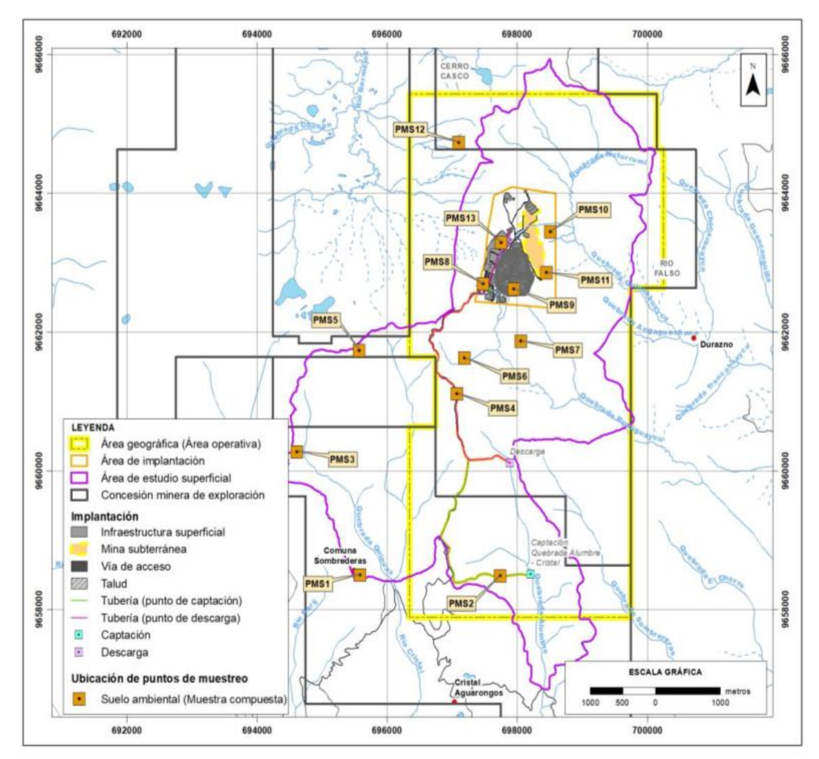


FIGURA 33. PUNTOS DE MUESTRO DE SUELO EN EL ÁREA DEL PROYECTO. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[86]

Algunos de los resultados más significativos corresponden a los parámetros de calidad (química) del suelo, pues se detectan concentraciones altas de metales como arsénico, azufre, cobre y plomo, que superan la "Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados" (que corresponde a la normativa vigente para Ecuador).

[86] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.

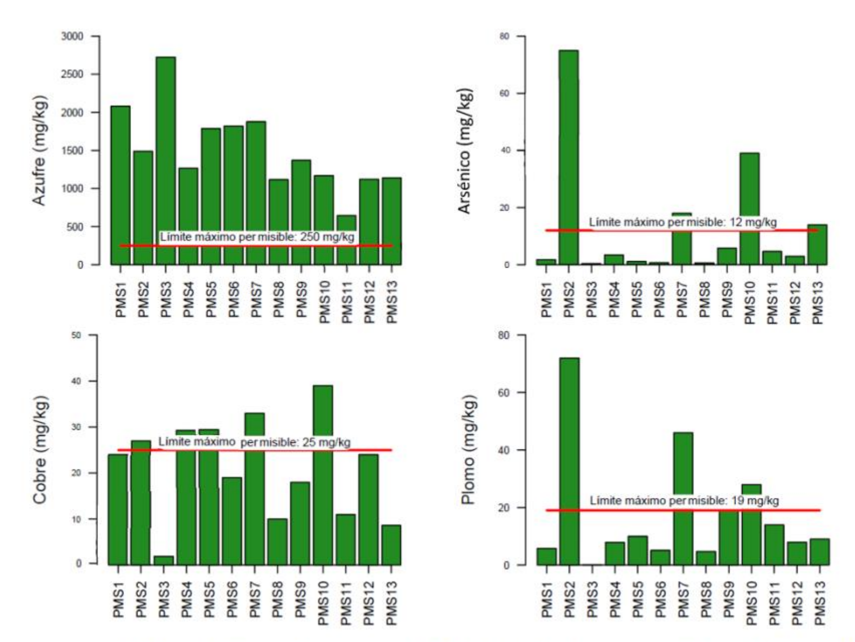


FIGURA 34. VALORES DE ALGUNOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE SUELOS EN EL ÁREA DEL PROYECTO LOMA LARGA. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[87]

Espacialmente no es evidente un patrón en la distribución de estas concentraciones altas de metales potencialmente tóxicos, pues estas se encuentran en varios puntos a lo largo del área operativa del proyecto. En el EsIA se atribuye la presencia de azufre al alto contenido de materia orgánica de los suelos de páramo, mientras que se propone un origen geogénico para las concentraciones de cobre, arsénico y plomo, sin entrar en ningún detalle acerca de los mecanismos que están generando su acumulación en el suelo y mencionando escuetamente que *"(...) se recomienda, a futuro, estudios con más detalle para explicar la presencia de las altas concentraciones de esos elementos (As, Cu y Pb) (...)"*

Hay que recordar que el yacimiento mineral de Loma Larga corresponde a un depósito de alta sulfuración donde es característica la presencia de sulfuros como la pirita, la enargita y su dimorfo luzonita, siendo estos últimos sulfuros de cobre y arsénico (**Cu3AsS4**). De manera muy preliminar es posible establecer una relación entre este mineral de ocurrencia común, y 3 de los 4 parámetros que presentan concentraciones por encima de la normativa ecuatoriana.

Lo anterior permite plantear que efectivamente existen fuentes geogénicas de metales tóxicos, pero además mecanismos naturales para que los suelos formados a partir de estas rocas puedan acumularlos. Esto configura un escenario de alta vulnerabilidad ante un proyecto de minería de metálicos en el cual quedarán expuestos grandes volúmenes de roca que contienen este tipo de elementos. Por esta razón, **no es admisible que los autores del informe recomienden que a futuro se deben realizar estudios más detallados acerca de la presencia de concentraciones altas de**

[87] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



elementos tóxicos para la salud humana y los ecosistemas, cuando es precisamente esa la motivación del EsIA: entender las características naturales del área de estudio, los procesos que allí se dan y exponer claramente los posibles impactos ambientales que se podrían derivar del proyecto teniendo en cuenta la línea base de información.

Las consideraciones alrededor de la presencia de metales tóxicos en la zona son fundamentales dentro de la evaluación del EsIA y por consiguiente se ahondará en los aspectos que regulan la movilidad de estos elementos, así como en la comparación de los resultados de la empresa minera con normativas internacionales, con el fin de lograr la máxima objetividad posible.

Por lo anterior, en la caracterización geológica hacen falta descripciones petrográficas y de microscopía electrónica rigurosas que brinden más información sobre las rocas presentes en el área, sobre aspectos de microfracturas y sobre los volúmenes estimados de ciertos minerales, pues de acuerdo con la descripción del yacimiento se dan asociaciones típicas de depósitos de alta sulfuración que incluyen la presencia de sulfuros como la pirita o la enargita, esta última con un alto potencial tóxico dado su contenido de arsénico.

Adicionalmente, se conoce por parte de otros proyectos mineros que en su momento se pretendieron desarrollar en ecosistemas de montaña similares en Colombia, como lo es La Colosa en el Tolima, y Angostura de la empresa Eco Oro Minerals en el páramo de Santurbán, donde las perforaciones de exploración se usaron también para la caracterización de la concentración de algunos elementos. Es ampliamente conocido que durante estas actividades de exploración se desarrollan una serie de análisis químicos que permiten cuantificar el contenido de elementos como metales pesados en materiales geológicos, incluyendo suelos y roca.

Sin embargo, se evidencia aquí que para la empresa minera que pretende explotar Quimsacocha no es una prioridad poner a disposición dicha información más allá de la cuantificación económica del yacimiento, por ejemplo, están ausente los perfiles de concentración de elementos tóxicos. Estos perfiles permiten ver la distribución de elementos como metales pesados y arsénico en el subsuelo, con lo cual se puede evaluar la disponibilidad de estos ante escenarios de exposición a la meteorización de materiales bien sea por la infraestructura minera como por el descenso del nivel freático.

2.2.5. Modelo hidrogeológico conceptual del proyecto minero

Como resultado de la caracterización geológica, hidrológica e hidráulica del área de estudio, en el EsIA se propone un modelo hidrogeológico conceptual que afirma la existencia de dos subsistemas que se describen de la siguiente manera:

- ***Sistema de Páramo:*** *Las aguas subterráneas poco profundas se encuentran en los suelos superficiales y en el material orgánico del sistema de humedales y/o almohadillas a gran altitud, el cual se denomina "páramo". El agua subterránea poco profunda o somera en el sistema de páramo está íntimamente asociada con el agua superficial y se caracteriza por un drenaje deficiente y una baja infiltración (baja permeabilidad) en la roca subyacente. El agua subterránea somera y el agua superficial en el sistema de páramo son las fuentes principales de descarga de agua subterránea en los arroyos y ríos cerca del sitio del PMLL. El*



<u>sistema de páramo esta desconectado hidráulicamente del sistema de agua subterránea más profunda (roca subyacente) debido a que la roca subyacente es de baja permeabilidad.</u> (subrayado fuera de texto). *La presencia del tipo de roca dentro de la caldera (también llamada "cráter" en esta sección), de forma similar, tiene baja permeabilidad y suelos superficiales de páramo como dentro de la zona de influencia de la mina, lo cual indica que es probable que, tal como se observa dentro del área planificada de la mina, la separación del agua subterránea somera y profunda continúa en las pendientes sobre la parte interior del cráter, que es más plana.*

- ***Sistema de Roca Subyacente:*** *En el área del PMLL, el agua subterránea profunda se encuentra en las fracturas, grietas y juntas dentro de la roca subyacente más profunda que no interactúa con el ecosistema de superficie. La roca subyacente en el área del PMLL no es porosa y contiene poca cantidad de agua, que está atrapada dentro de la estructura actual de la roca. <u>Debido a que la cantidad de agua en esta roca subyacente profunda existe principalmente en fracturas y grietas y es pequeña, no cumple con la definición de un acuífero y no es una fuente importante de suministro de agua subterránea a los ríos y quebradas cerca del PMLL</u>* (subrayado fuera de texto)

Dentro de este modelo conceptual se destacan algunos puntos fundamentales. Para el caso del páramo se resalta su importancia en términos del aporte de agua para mantener los cuerpos hídricos superficiales, pero al mismo tiempo se enfatiza el hecho de la supuesta desconexión hidráulica con la roca subyacente. Al respecto, se agrega la siguiente apreciación:

> *"El PMLL se encuentra en las partes altas de los Andes y recibe aproximadamente 1000 mm por año (mm/año) de precipitación. El agua lluvia generalmente ingresa a las quebradas mediante precipitación directa o escorrentía superficial; o se almacena en los suelos delgados del sistema de páramo y se libera como agua superficial. <u>Según la simulación del modelo de flujos de agua subterránea, menos del 1 % de la precipitación ingresa al agua subterránea del sistema más profundo de roca subyacente</u>* (subrayado fuera de texto). *El agua subterránea dentro del sistema más profundo de la roca subyacente se mueve muy lentamente, de tal forma que puede tomar cientos de años para que el agua subterránea se mueva a través del sistema de la roca subyacente antes de que se descargue a los ríos y arroyos que rodean el sitio del PMLL."* (negrita fuera de texto)

En ausencia de argumentos contundentes o pruebas en campo que permitan cuantificar la recarga de las aguas subterráneas profundas, este modelo conceptual se apoya casi que exclusivamente en un modelo numérico de aguas subterráneas que no considera el área de influencia. Como se verá más adelante, dadas las inconsistencias y errores en la formulación y conceptualización del modelo numérico, el valor de 1 % de precipitación que supuestamente ingresa al subsuelo carece de cualquier significancia y por lo tanto le resta solidez al modelo conceptual planteado, dejando un aspecto central del estudio ambiental como lo es el ciclo del agua, como solo en un compendio de opiniones de los autores del EsIA. El páramo es representado como una capa continua muy limitada a profundidad que es capaz de retener casi la totalidad de la precipitación (99 %), permitiendo que



solo el 1 % se infiltre. De igual manera **se proponen dos superficies de nivel de agua,** una asociada al páramo y otra asociada a la roca subyacente.

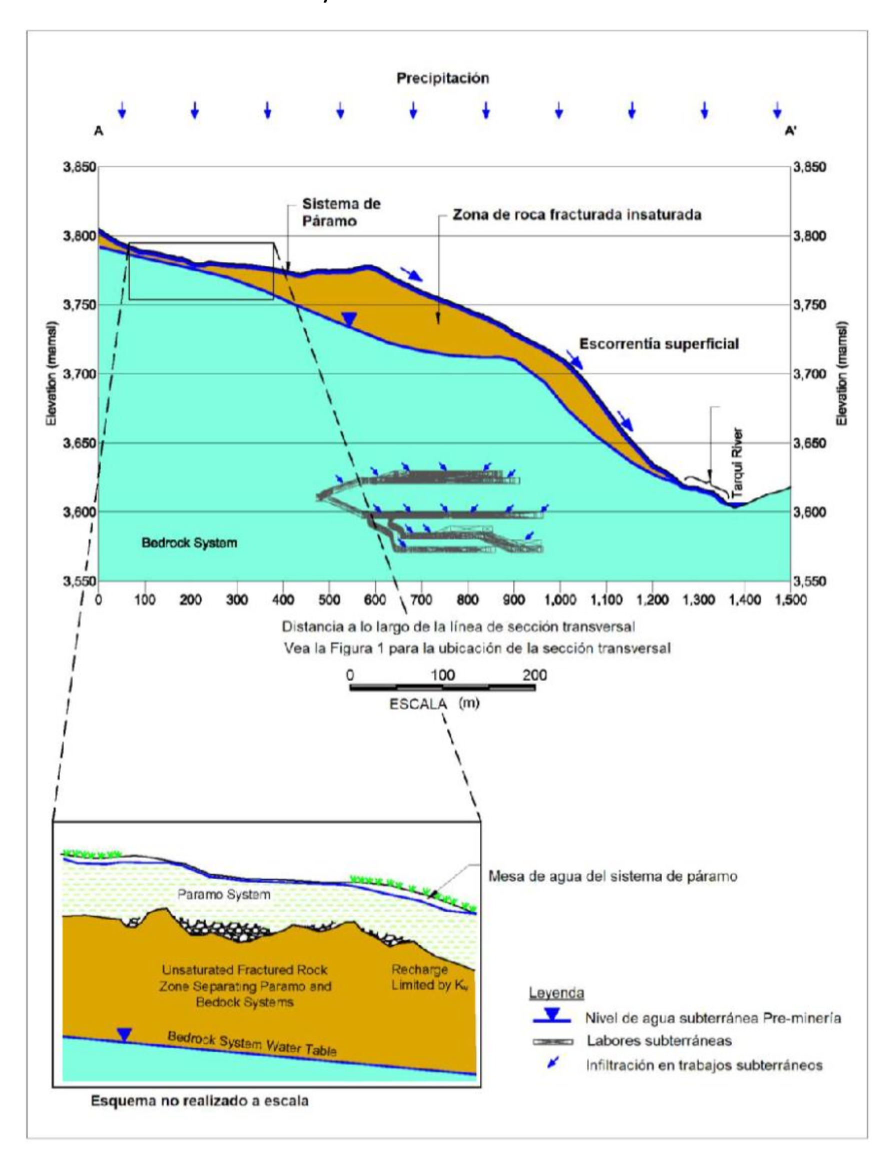


FIGURA 35. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL ILUSTRANDO LOS "SUBSISTEMAS" DE PÁRAMO Y DE ROCA SUBYACENTE. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[88]

Aunque para el sistema de rocas subyacente se resalta la importancia de las fracturas y grietas, estas no se ven representadas en el modelo conceptual y se afirma con extrema ligereza que allí la cantidad de agua es "*pequeña*". Como ya se expuso anteriormente, la caracterización estructural efectuada en el EsIA ambiental es de muy mala calidad y los datos recolectados de manera independiente por Terrae en este informe (e incluso también los contenidos en el EsIA) sugieren la

88 INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.

importancia de las fracturas en el flujo de agua subterránea y particularmente en los flujos verticales relacionados a la recarga.

En relación con la importancia de las fracturas y la clasificación geotécnica en las propiedades hidráulicas del macizo rocoso, en el EsIA se presentan algunos datos de RMR:

Alteración	Q' 50	RMR50	RMR*50
Fresca	13,2	67	n/a
Silica	20,5	71	73
Caolinítica	7,7	62	63
Illta	6,2	60	54
Propilítica	9,7	64	63
Dicrita	9,6	64	66
Alteración	**Q' 50**	**RMR50**	**RMR*50**
Esmitsonita	8,4	63	52
Esmitsonita y clorito	4,4	57	57
Esmitsonita y clorita	3,1	54	46

TABLA 4. RESUMEN DE VALORES DE CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE ROCAS. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[89]

A partir de estos datos, se puede aproximar una conductividad hidráulica mediante aproximaciones empíricas que permiten relacionar las características hidráulicas del medio con las características del macizo rocoso (directamente relacionadas a la ocurrencia y características de las fracturas). Una revisión de la bibliografía en este sentido se encuentra en Shahbazi (2020)[90], donde se encuentran algunas ecuaciones empíricas para aproximar la conductividad hidráulica como la siguiente:

$$K\ (\mathrm{uL}) = 5 \times 10^{6} \exp(-0{,}1923 \times RMR)$$

De acuerdo con esta ecuación empírica se obtiene una conductividad hidráulica de 7,1 x 10^{-5} m/s en el mejor de los casos, y de casos 5,88 x 10^{-7}m/s en el peor. Estos valores se utilizan como referencia, pero muestran que pueden existir rocas en la zona con valores moderados de conductividad hidráulica.

En contraste con estos valores, los ensayos de Lugeon realizados por la empresa minera y cuyos resultados se presentan en el EsIA, reportan valores entre 1,4 x 10^{-9} y 1 x 10^{-6} m/s para la conductividad hidráulica. En la sección correspondiente al análisis del modelo numérico se presentará la inconveniencia de estos ensayos, las consideraciones que se deben tener en medios fracturados y las razones por la que pueden estar subestimando la conductividad hidráulica del medio rocoso, que tiene grandes implicaciones en las velocidades con las que se mueve el agua en el subsuelo y las posibles afectaciones de la excavación minera. Las diferencias entre los estimativos

89 INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.

90 Shahbazi, A., Saeidi, A., & Chesnaux, R. (2020). A review of existing methods used to evaluate the hydraulic conductivity of a fractured rock mass. Engineering Geology, 265, 105438



de Terrae y los de la empresa minera pueden llegar a tener diferencias de 10.000 veces, con lo cual se pueden estar subestimando grandemente por parte de la minera tanto la afectación por la velocidad de los abatimientos de los niveles freáticos como el caudal que podría ser afectado por la explotación.

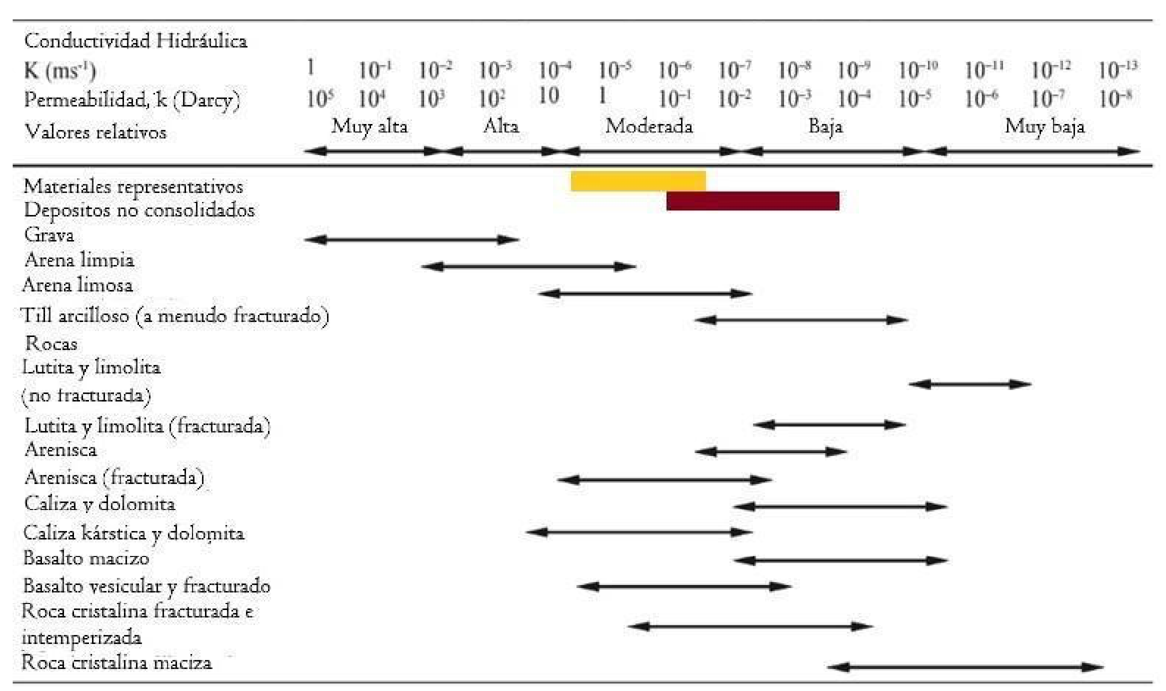


FIGURA 36. RANGO DE VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA PARA DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES GEOLÓGICOS. EN NARANJA SE MUESTRA LA ESTIMACIÓN EMPÍRICA REALIZADA EN ESTA EVALUACIÓN INDEPENDIENTE POR TERRAE Y EN ROJO OSCURO EL RANGO DE RESULTADOS OBTENIDO POR LA EMPRESA MINERA EN SU ESIA. FUENTE: MODIFICADA DE SINGHAL Y GUPTA (2010) [91]

En relación con la hipótesis de dos subsistemas desconectados: el páramo y la roca profunda, se identifican graves errores conceptuales que tienen incidencia en el entendimiento del flujo del agua subterránea. En la figura que resume el modelo conceptual se aprecia que los autores proponen la existencia de dos niveles de agua subterránea independientes, cada uno asociado a los dos subsistemas en cuestión. A partir de esto se puede inferir que el sistema de páramo se propone como un acuífero colgado cuyos niveles son totalmente independientes de los de la roca subyacente. Si esto es cierto, no se entiende como los pocos datos existentes de nivel freático se mezclan indiscriminadamente sin señalar de manera clara a cuál de los dos subsistemas pertenecen.

Lo anterior indica el desconocimiento de conceptos básicos de hidrogeología y la confusión que tienen los autores del EsIA respecto a su propio modelo conceptual. Si estos dos sistemas existen y además están desconectados, cada uno de ellos debería tener su propia dinámica de flujo y se deberían presentar mapas independientes de la dirección de flujo del agua subterránea, soportados en datos de nivel freático que asimismo deben estar discriminados y corresponder específicamente

[91] Singhal y Gupta (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer.



a uno de los dos sistemas propuestos. No obstante, lo que se encuentra es un mapa de contornos piezométricos que utiliza todos los datos de manera indistinta para plantear una dirección de flujo.

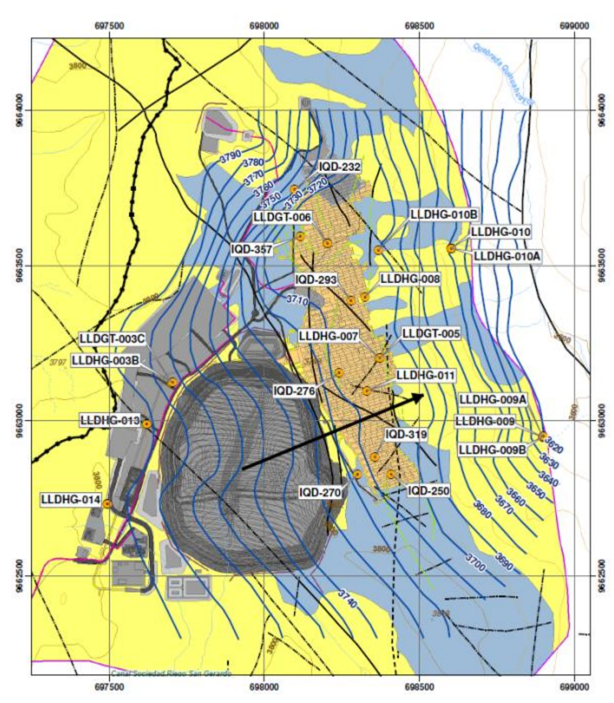


FIGURA 37. MAPA DE CONTORNOS PIEZOMÉTRICOS Y DIRECCIÓN INTERPRETADA DE FLUJO. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[92]

Lo que este mapa sugiere es que entonces solo hay un sistema y un solo nivel freático. En este punto también es preciso señalar que en el EsIA no existen datos de monitoreo continuo de niveles que permitan entender la dinámica del agua subterránea, lo cual es fundamental en el caso de macizos rocosos fracturados donde las dinámicas pueden ser mucho más complejas.

El modelo hidrogeológico conceptual, por lo tanto, siembra grandes incertidumbres respecto a la existencia de los dos subsistemas planteados. Sin embargo, en lo que respecta a la dirección de flujo lo más razonable es que esta sí se presente de manera local siguiendo la topografía, y en el caso del proyecto Loma Larga, desde la parte alta donde se ubicaría la infraestructura superficial del proyecto y hacia la quebrada Quinuahuaycu (más abajo río Irquis, y después río Tarqui, luego de su confluencia con el río Portete). En relación con esta quebrada, el modelo plantea - al menos gráficamente – que recibe aportes del agua subterránea.

[92] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.

Transversal 15B No. 46 – 16 Of. 506 Tel: 340 24 62 Bogotá D.C., Colombia
info@terraegeoambiental.org



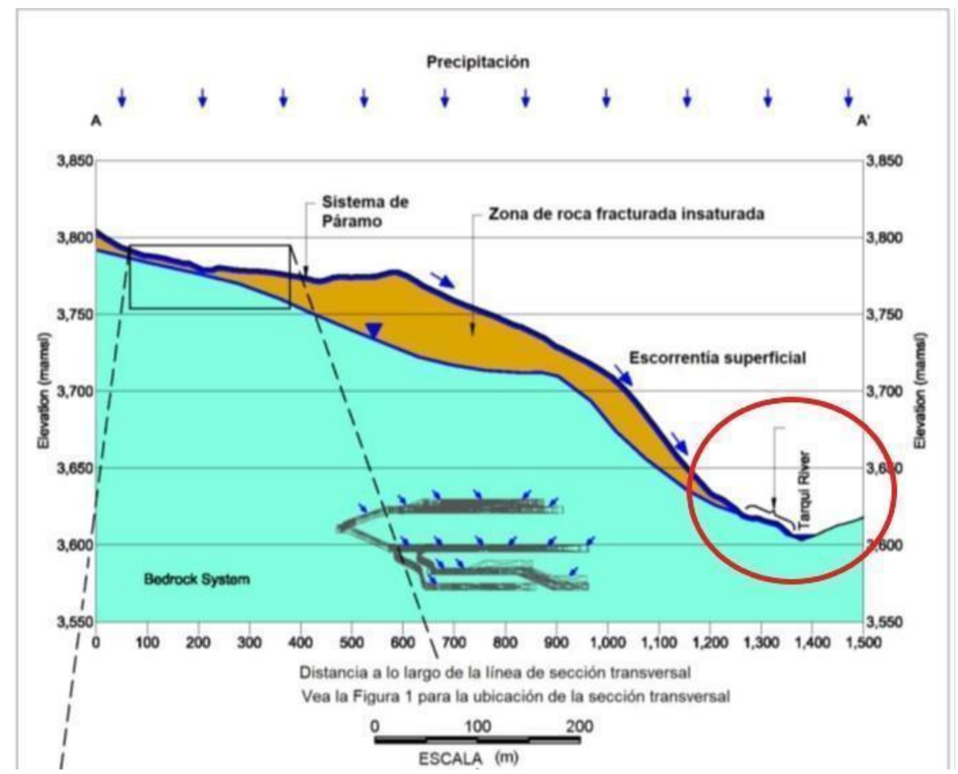


FIGURA 38. DIRECCIÓN DE FLUJO LOCAL DESDE LAS PARTES ALTAS HACIA LOS VALLES Y POSIBLE CONDICIÓN DE APORTE DEL AGUA SUBTERRÁNEA A LOS DRENAJES SUPERFICIALES EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN DEL NIVEL FREÁTICO. FUENTE: MODIFICADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[93]

Esta representación gráfica genera dudas en relación con las afirmaciones realizadas en el capítulo de hidrología, donde se asevera contundentemente que tanto la recarga de aguas subterráneas como el flujo base proveniente de las mismas son despreciables dentro del balance hídrico. Como se verá más adelante en el análisis del modelo numérico, los resultados del abatimiento y la afectación al flujo de agua de la quebrada Quinuahuaycu también entran en conflicto con los argumentos que se exponen en la sección de hidrología.

Finalmente, una de las grandes deficiencias del modelo hidrogeológico conceptual es la extensión considerada. Como se expuso en el segmento inicial de este informe, el área de estudio subterránea fue arbitrariamente delimitada de acuerdo con los resultados del modelo numérico (del cual se expondrán las múltiples deficiencias en una sección posterior). El área considerada para el modelo hidrogeológico conceptual no permite comprender cómo es el sistema de flujo regional y cuáles pueden ser los posibles impactos sobre las comunidades que se ubican cerca al proyecto, que incluyen a San Gerardo, Girón, Tarqui o Cuenca. A falta de más información por parte de la empresa minera en su EsIA es razonable pensar que la dirección de flujo regional de las aguas subterráneas debe darse siguiendo de manera general la topografía.

[93] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



La distribución de los manantiales identificados en campo y su tipología, brinda indicios respecto a la dinámica de las aguas subterráneas. Los manantiales asociados al colchón de agua del páramo se encuentran hacia las partes más altas y de acuerdo con las observaciones realizadas su funcionamiento es similar a la de los humedales: pueden actuar como zonas de recarga o de descarga de acuerdo con las condiciones naturales.

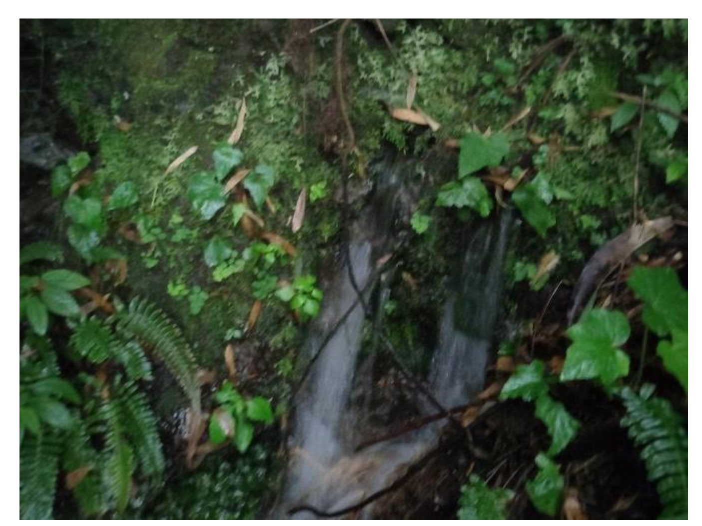
Al parecer, la pendiente es un factor fundamental para determinar su funcionamiento. En pendientes menores a 5° predominaría la recarga, mientras que en pendientes superiores hay una tendencia a la descarga y a generar flujos superficiales.



FOTOGRAFÍA 1. MANANTIAL ASOCIADO AL PÁRAMO. FOTOGRAFÍA PROPIA, JUNIO DE 2022.

Por otro lado, los manantiales asociados a la roca o a depósitos superficiales (generalmente coluviales) se encuentran en los valles profundos de algunas quebradas, generalmente en una posición a media ladera, generando flujos de salida que pueden constituirse en aportes significativos al caudal de las quebradas. Esta observación es relevante porque confirma la importancia de las aguas subterráneas como fuente de aporte para las aguas superficiales.





FOTOGRAFÍA 2. MANANTIAL FLUYENDO DIRECTAMENTE DE LA ROCA. FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA.

Uno de los aspectos más relevantes es la relación espacial de estos manantiales. Como ya se mencionó, en un marco general del páramo como principal zona de recarga de aguas subterráneas, es muy probable que los manantiales asociados al páramo sirvan también como zonas de recarga (asociadas al colchón de agua), mientras que los manantiales asociados a la roca funcionan como puntos de descarga en las zonas de media ladera.

Es razonable por lo tanto plantear una dirección general del flujo de aguas subterráneas y una conexión del sistema. Es preocupante que la empresa minera en su EsIA no reconozca estos manantiales asociados a la roca y sus implicaciones en el modelo hidrogeológico.



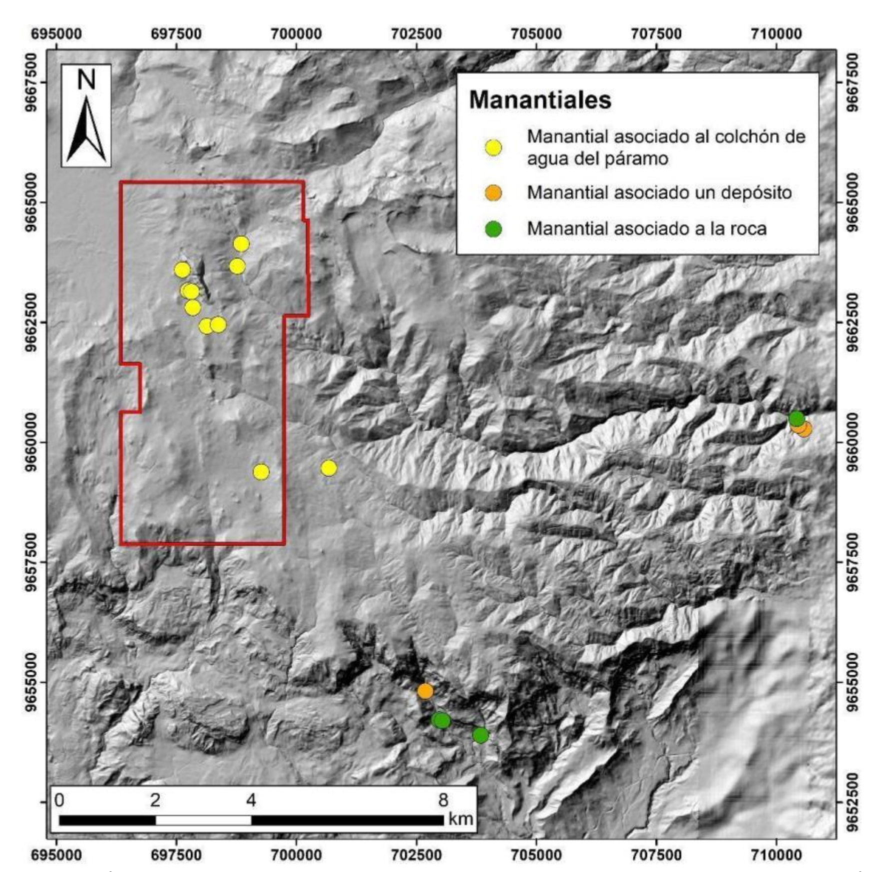


FIGURA 39. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS MANANTIALES IDENTIFICADOS EN CAMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN DATOS DE CAMPO DE TERRAE.

Sin embargo, siguen existiendo grandes incertidumbres respecto a la conexión entre el sistema de páramo y las aguas subterráneas "profundas", las cuales no son resueltas en el EsIA debido a las múltiples contradicciones en el modelo conceptual. Cabe destacar que después de revisar el EsIA, no se identificó la implementación de metodologías que permitan obtener evidencias directas del intercambio entre aguas superficiales y aguas subterráneas, como las descritas por Woessner, (2020)[94]. En las siguientes secciones se presentan argumentos que exhiben de manera más clara las contradicciones existentes en la hipótesis de la desconexión del páramo con las aguas subterráneas.

2.3 La caracterización geológica estructural preliminar de Terrae

Durante el levantamiento de información propia en campo por parte de Terrae se recolectaron datos estructurales (principalmente de fracturas) para un área mucho mayor que la considerada por la empresa minera en el EsIA.

En total se levantaron más de 200 datos cuya distribución espacial se presenta en la siguiente figura, haciendo uso de los diagramas de polos. También se midieron fallas geológicas en escala de afloramiento (mesoscópicas o métricas) que permiten proponer el tipo de esfuerzos tectónicos que

[94] Woessner, W. (2020) Groundwater – Surface Water Exchange. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2020.



existen en el páramo de Loma Larga y con base en ello reinterpretar la deformación tectónica (fracturas), lo que a su vez se constituye en un insumo fundamental para evaluar la calidad del EsIA y para proponer aproximaciones en temas de recarga de acuíferos.

2.3.1. Análisis regionales

Se realizó un análisis de alineamientos geológicos como se ilustra en la siguiente figura a partir de modelos de elevación digital (DEM) de resoluciones de 30 y 3 metros y a distintas proyecciones azimutales de sombras (45°, 315°, 180°) que permitieron definir rasgos geomorfológicos característicos de la afectación tectónica en el terreno.

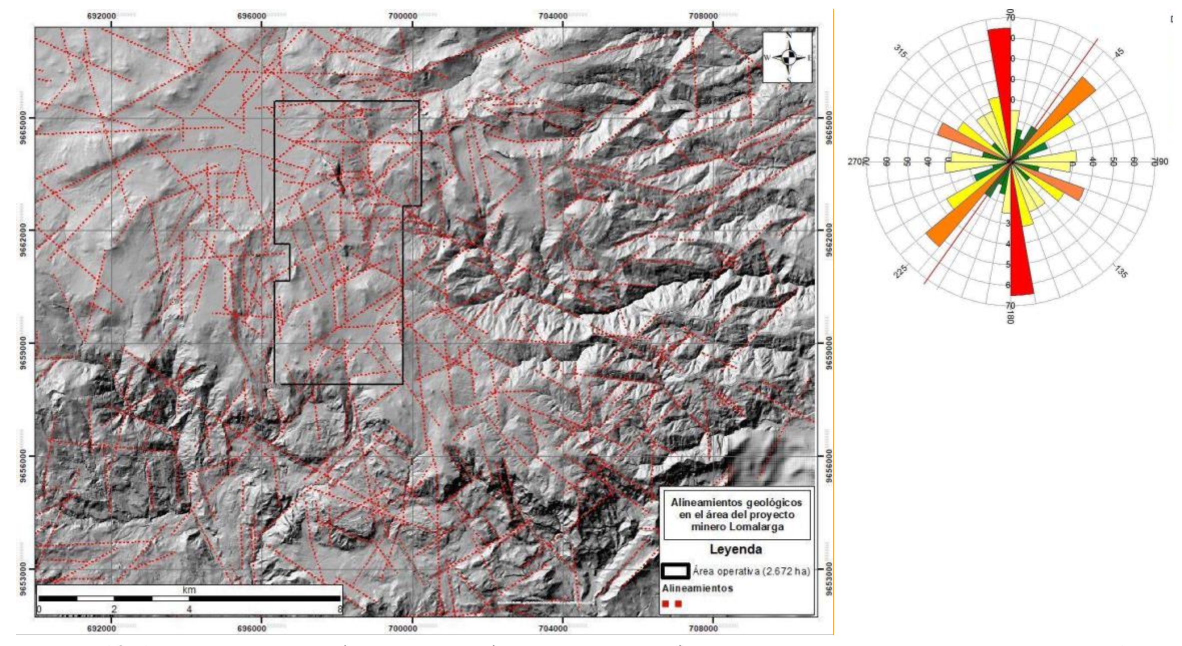


FIGURA 40. ALINEAMIENTOS TECTÓNICOS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO. NÓTENSE EL INTENSO FRACTURAMIENTO GENERAL. A LA DERECHA, DIAGRAMA DE FRECUENCIA DE LAS DIRECCIONES DE LOS ALINEAMIENTOS TECTÓNICOS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO. NÓTENSE EL PREDOMINIO DE RASGOS NORTE SUR SEGUIDO POR NE-SW Y SISTEMAS ASOCIADOS NW-SE Y E-W. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Las direcciones preferenciales de los alineamientos geológicos en la zona fueron Norte-Sur y NE-SW, con rasgos NW-SE menos marcados, pero también evidentes, como se muestra en la siguiente figura. La dirección predominante Norte-Sur puede estar influenciada por el sistema de fallas del río Falso, descrito con esta dirección para la misma zona geográfica (MacDonald et al., 2012), por lo que potencialmente este sistema puede servir como ductos de agua subterránea articulando la parte alta (Quimsacocha) con la parte baja en Girón y San Gerardo. Por otro lado, la dirección predominante NE-SW puede estar ligada a la falla Ganarín y falla Bulubulu, las cuales cortan la caldera y zonas aledañas de Quimsacocha.

También existen rasgos con orientación NW-SE y E-W que fueron detectados y cuyos principales exponentes se cruzan justamente en la zona de interés minero, constituyendo zonas complejas de intenso fracturamiento, tal como se observó en campo.



Adicionalmente, en este documento generado por Terrae se infirieron fallas geológicas a partir de la interpretación del mapa de sombras del modelo digital de terreno. Las fallas principales corresponden a la de río Falso (dirección norte-sur con un ancho considerable de deformación, la falla que se muestra a continuación:

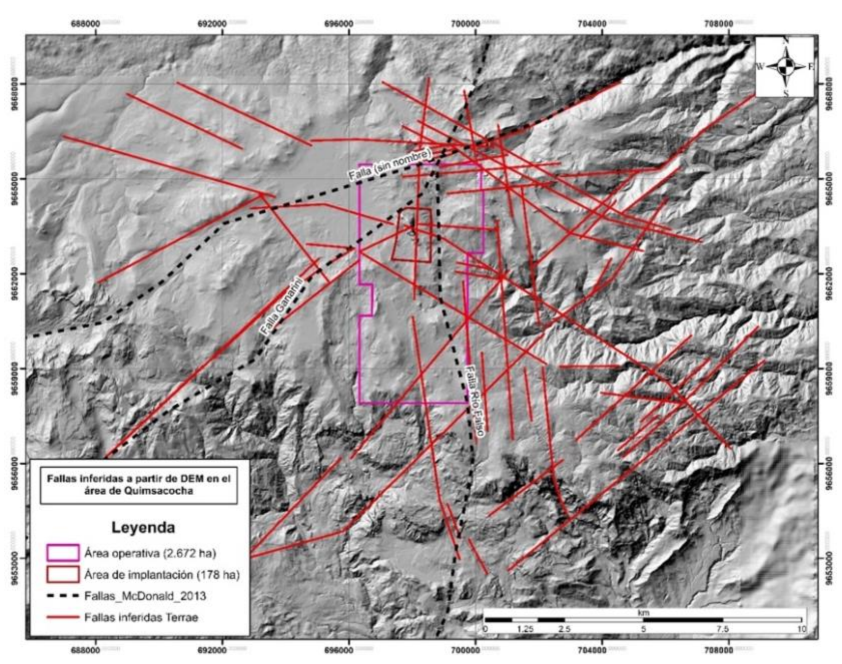


FIGURA 41. FALLAS GEOLÓGICAS INFERIDAS, LAS PRINCIPALES EN COLOR ROJO Y FALLAS MENORES EN COLOR AZUL. ESTAS FALLAS SON COHERENTES CON LOS RESULTADOS DE LOS ALINEAMIENTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Posteriormente, se elaboró un mapa de densidad de alineamientos geológicos con el fin de inferir las zonas más fracturadas. Se determinaron tres zonas importantes, la primera (Zona A) corresponde a la zona de Loma Larga, dentro del área operativa del proyecto, la segunda (Zona B), al occidente del área operativa y la tercera (Zona C) al sur del área operativa sobre el escarpe o cambio geomorfológico entre la Fm. Quimsacocha y la Fm. Tarqui.

La zona A se podría encontrar ligada al cruce entre la falla Río Falso y la falla Ganarín generando una zona de daño o zona mayormente fracturada por entre la cual se pueden generar flujos de agua subterránea profundos, ya que estas fallas y su zona de daño está afectando a la Formación Quimsacocha y la Formación Tarqui, donde estratigráficamente la Fm. Además, la zona A también presenta una alta densidad de alineamientos geológicos en lo presentado por INV Metals. Quimsacocha suprayace a la Fm. Tarqui.

La zona B puede estar fuertemente influenciada por la falla Ganarín cuyo trazado se encuentra exactamente en esa dirección sobre el área resaltada con una alta densidad de alineamientos. La Zona C puede estar influenciada por el sistema de fallas del Río Falso, que atraviesan por esa zona dirección norte-sur. En conclusión, la interacción entre las fallas regionales identificadas por varios autores nombrados anteriormente y en concordancia con las direcciones preferenciales de los



alineamientos geológicos identificados se puede estar generando una gran zona de daño o una gran zona fracturada en la parte alta de Quimsacocha, que puede estar asociada a flujos de agua profundos y esto sería indicio de que la parte nororiental de la caldera puede funcionar como zona de recarga, lo cual iría en contravía del argumento de INV Metals:

> "*El sistema de páramo esta desconectado hidráulicamente del sistema de agua subterránea más profunda (roca subyacente) debido a que la roca subyacente es de baja permeabilidad*".

Este tipo de afirmaciones son también contrarias a lo presentado en el estudio geotécnico por INV Metals donde se puede leer:

> *"Las interpretaciones de los datos estructurales muestran que la masa rocosa de Loma Larga contiene un número significativo de fallas subverticales con varias orientaciones. Las manchas de color de hierro, visibles en las superficies de los fragmentos de núcleo recuperados, indican la presencia de aguas subterráneas. Esto sugiere que las fallas en Loma Larga son probablemente conductoras y pueden servir como conductos para que las aguas subterráneas entren en las galerías de la mina subterránea"*

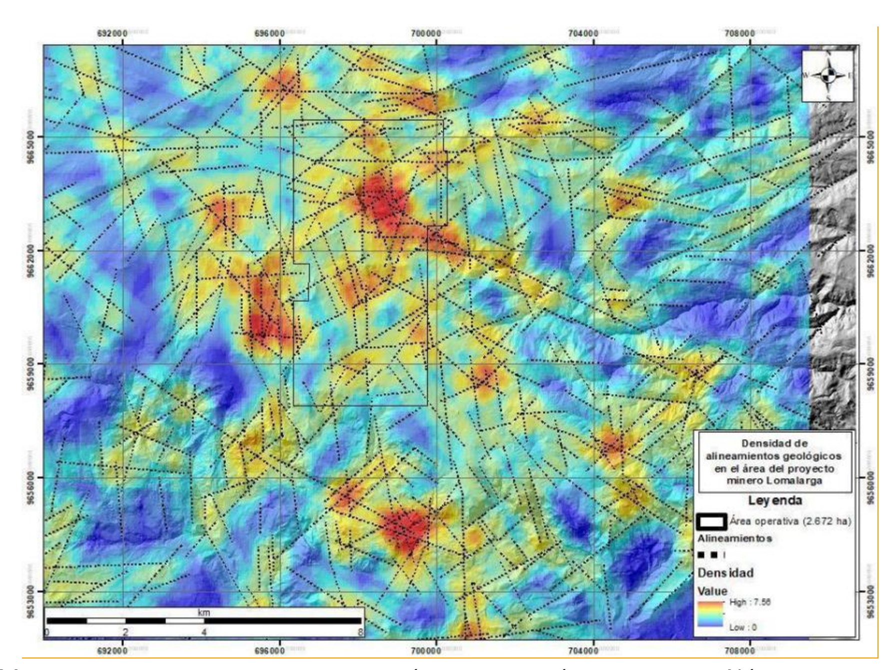


FIGURA 42. MAPA DE DENSIDAD DE ALINEAMIENTOS TECTÓNICOS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO. NÓTENSE LOS COLORES CÁLIDOS COINCIDENTES CON LA ZONA DEL YACIMIENTO MINERO, LO CUAL PUEDE INDICAR QUE ESA ZONA TIENE UN INTENSO FRACTURAMIENTO CON SUSCEPTIBILIDAD DE SER ZONA DE RECARGA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

2.3.2. *Los esfuerzos tectónicos en Quimsacocha*

Se midieron 4 datos de fallas mesoscópicas en algunos afloramientos ubicados en el área de influencia del proyecto Loma Larga. Los resultados son preliminares, dado los pocos datos de soporte, pero es pertinente anotar que la empresa minera no ha hecho ningún aporte ni ninguna



aproximación en esta materia, fundamental para el entendimiento de los flujos y para tener un modelo coherente de los acuíferos por fractura en roca.

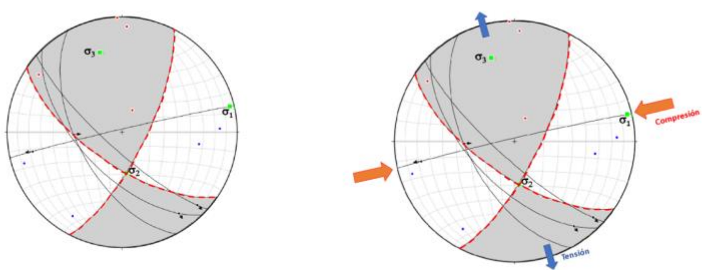


FIGURA 43. ESQUEMA DE DIRECCIONES DE ESFUERZOS TECTÓNICOS PARA QUIMSACOCHA CON ESFUERZOS PREDOMINANTEMENTE TRANSCURRENTES. A LA DERECHA, VECTORES DE COMPRESIÓN Y TENSIÓN, LOS ÚLTIMOS PARTICULARMENTE RELEVANTES PARA ESTABLECER LAS FRACTURAS MÁS ABIERTAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Los resultados muestran que los esfuerzos corresponderían a transcurrentes casi puros, donde el $\boldsymbol{\sigma_1}$ se ubica en cercanías a la dirección E-W (077/04), situación que hace que se generen compresiones en esa dirección. Más importantes para relacionar con las aguas subterráneas es la dirección relacionada con $\boldsymbol{\sigma_3}$ cercana al eje N-S (345/29) que generan fracturamiento de gran apertura con dirección E-W, como se ve en la figura siguiente.

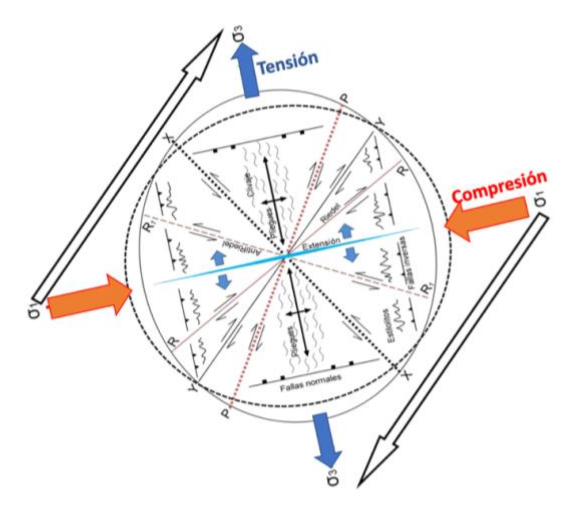


FIGURA 44. ELIPSE DE DEFORMACIÓN PARA QUIMSACOCHA. LOS ESFUERZOS TRANSCURRENTES GENERAN UNA GRAN CANTIDAD DE FALLAS GEOLÓGICAS EN DIFERENTES DIRECCIONES QUE POSIBILITA UNA MUCHA MAYOR INTERSECCIÓN DE FRACTURAS, HACIENDO MÁS FÁCIL EL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. POR OTRO LADO, GENERA COMO PRINCIPAL MANERA DE DEFORMACIÓN, FRACTURAS VERTICALES Y SUBVERTICALES. TODO ELLO HACE IMPROBABLE LA HIPÓTESIS DE DESCONEXIÓN ENTRE ACUÍFEROS SUPERFICIALES Y PROFUNDOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La hipótesis de esfuerzos transcurrentes basados en la interpretación del DEM y los datos de fallas geológicas medidas en campo también se soportan en el hecho de que la mayor parte de las fracturas medidas en campo (cerca de 200 datos) tienen un predominio muy marcado de inclinaciones cercanas a la vertical. Esto se mostrará en el siguiente numeral.



2.3.3. El carácter transcurrente de los esfuerzos fractura las rocas y genera verticalidad

Como tema introductorio, los esfuerzos transcurrentes o combinados (transpresivos o transtensivos) generan fracturas predominante verticales o subverticales. Ese parece ser el contexto tectónico y estructural del páramo de Quimsacocha, por tanto, habrá una mayor facilidad para que las aguas subterráneas se muevan a través de las rocas en sentido vertical. Veremos que el desconocimiento de la empresa minera sobre estas temáticas lleva a plantear hipótesis contrarias a la realidad.

Los 228 datos de fracturas medidos durante la fase de levantamiento geoambiental rápido realizado por profesionales de Terrae en junio de 2022, permitieron generar un tratamiento estadístico con el uso de redes estereográficas donde se grafican los vectores de los planos medidos (polos). Los diagramas de concentración de polos evidencian el predominio de fracturas verticales a lo largo de todo el sector (la verticalidad se ve como una mayor concentración de polos hacia los bordes de la red estereográfica, indicando inclinaciones cercanas a 90°). El histograma de inclinación de los planos elaborado a partir de la totalidad de datos estructurales medidos en campo confirma esta tendencia, pues más del 90 % de los datos medidos tienen inclinaciones superiores a los 60°

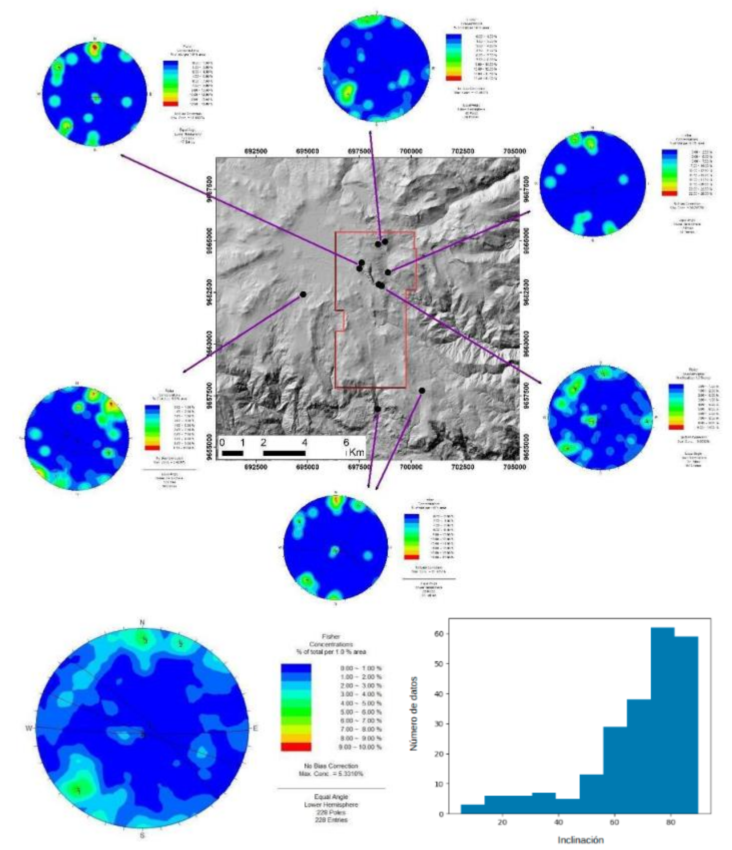


FIGURA 45. DIAGRAMAS DE POLOS DE DISCONTINUIDADES MEDIDAS POR TERRAE EN EL ÁREA DE ESTUDIO. ARRIBA: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS DISCONTINUIDADES. ABAJO: ORIENTACIÓN E INCLINACIONES TÍPICAS DE TODOS LOS DATOS MEDIDOS, EN DIAGRAMA DE POLOS (IZQUIERDA) E HISTOGRAMA (DERECHA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Adicionalmente, el análisis de las direcciones preferenciales, en que se presentan las discontinuidades en función de la deformación imperante en la zona, es de utilidad para comprender cuales son las fracturas más dominantes y algunas características de importancia respecto a su comportamiento hidrogeológico, como las aberturas. En la siguiente figura se presentan diagramas rosas ilustrando la orientación de las discontinuidades en función de la ubicación espacial. Más abajo se presenta el diagrama general elaborado con todas las discontinuidades medidas en campo, comparado con las direcciones de algunas fracturas para las que se midieron aberturas amplias (parte inferior derecha), entendiéndose por "amplias" como aquellas superiores a 5 mm, alcanzando en varias ocasiones algunos metros.

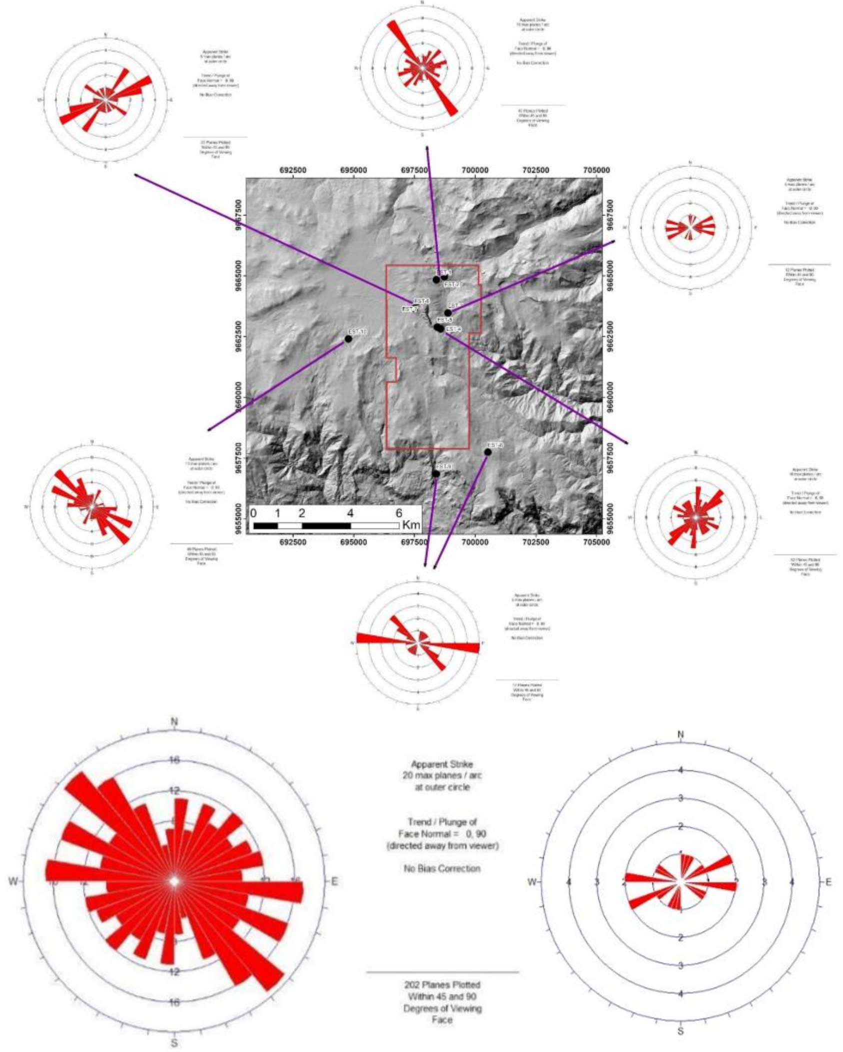


FIGURA 46. DIAGRAMAS DE ROSA DE DIRECCIÓN DE DISCONTINUIDADES MEDIDAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO EN EL MARCO DE ESTA EVALUACIÓN. ARRIBA: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS DISCONTINUIDADES. ABAJO IZQUIERDA: ORIENTACIÓN GENERAL DE TODOS LOS DATOS MEDIDOS. ABAJO DERECHA: ORIENTACIÓN DE FRACTURAS ABIERTAS, LAS CUALES SON COHERENTES CON EL ESQUEMA DE ESFUERZOS TECTÓNICOS OBTENIDOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Esta distribución permite concluir que existe una mayor ocurrencia de fracturas en una dirección N45W, relacionada con fallas de rumbo de carácter dextral y los datos de fracturas con mayor abertura son perfectamente coherentes con el campo de esfuerzos determinado y corresponderían a las discontinuidades relacionadas con fallas normales. También permite ver una gran cantidad de direcciones, que facilitan la intersección entre fracturas, lo cual, conjugado con su carácter predominantemente vertical hace completamente improbable la desconexión entre rocas que afloran en superficie con los suelos de páramos y a su vez con las rocas en profundidad.

No obstante, los análisis realizados por Terrae, hay un aspecto de mayor peso y relevancia y es la propia existencia de fracturas que pueden ser vistas y medidas en el territorio. No es posible que se planteen rocas impermeables en los modelos que supuestamente existen y que desconectan el subsuelo rocoso del suelo de los páramos. Negar la existencia de un macizo rocoso fracturado en la zona donde se pretende realizar el proyecto de Loma Larga está en contra del principio de realidad.




FOTOGRAFÍA 3. FRACTURAMIENTO INTENSO DE ROCAS QUE SE OBSERVAN EN LA ZONA DE INTERÉS MINERO O EN SUS ADYACENCIAS. FOTOGRAFÍA PROPIA, JUNIO DE 2022.

2.4 Consideraciones hidrogeoquímicas respecto a la relación del páramo con las aguas subterráneas “profundas”

Debido a la inadecuada elección del área de estudio subterránea, a la limitación espacial de los piezómetros o puntos de agua considerados en el EsIA y a la falta general de información que permita comprender de mejor manera el sistema de flujo subterráneo regional, no es posible establecer tendencias claras en la variación de los parámetros químicos del agua que se relacionan con el grado de mineralización o evolución química, al menos desde el punto de vista del análisis espacial. Sin embargo, los datos químicos disponibles en el EsIA, y en particular la concentración relativa de iones mayores, sí permiten abordar esta temática y llegar a plantear algunas observaciones concernientes a la dinámica de recarga y tránsito de las aguas subterráneas.

Al respecto, en el EsIA se afirma que *“los piezómetros LLDHG- 009A, LLDHG-009B, LLDHG-0010A, LLDHG-010B son capaces de monitorear los parámetros de calidad del agua de línea base y actividades operacionales asociadas con aguas subterráneas poco profundas. LLDHG-003C y LDGT-*



006 se pueden utilizar para monitorear las condiciones de calidad del agua subterránea de la roca profunda". Esta subdivisión es coherente con el modelo propuesto en el EsIA y permite plantear algunas hipótesis iniciales.

En este punto se deben señalar las incoherencias identificadas en la nomenclatura utilizada para los piezómetros. A partir de la comparación con las coordenadas presentadas en el documento se unifica dicha nomenclatura, señalando la ubicación y características de los puntos donde se cuenta con información hidrogeoquímica:

NOMBRE	ELEVACIÓN (m)	PROFUNDIDAD NIVEL FREÁTICO (m)	NIVEL FREÁTICO (m)
LLDHG-003C	3784,7	88,35	3696,4
LLDGT-006	3746,7	39,3	3707,4
LLDHG-009	3627,7	3,5	3624,2
LLDHG-009A	3626,9	1,5	3625,4
LLDHG-010	3665,7	4,6	3661,1
LLDHG-010A	3730,7	0,8	3729,9
LLDHG-013	3799	6,98	3792,02
LLDHG-014	3796	1,82	3794,18

TABLA 5. INFORMACIÓN BÁSICA DE LOS PIEZÓMETROS DONDE SE CUENTA CON ANÁLISIS QUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[95]

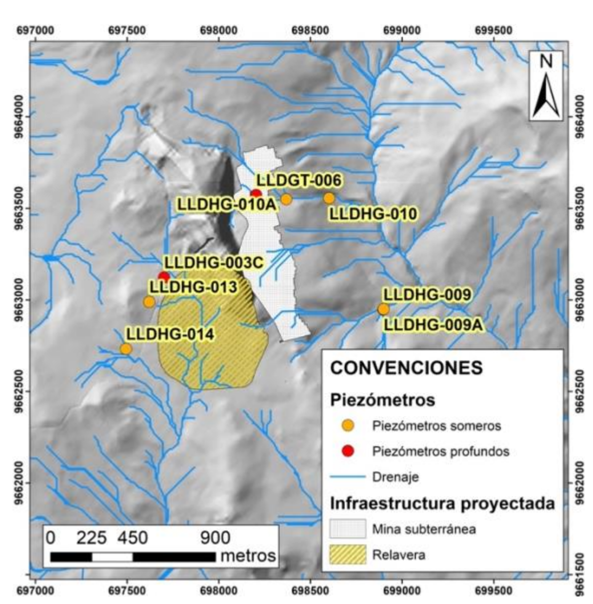


FIGURA 47. UBICACIÓN DE LOS PIEZÓMETROS DONDE SE CUENTA CON ANÁLISIS QUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[96]

[95] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.
[96] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



De la figura anterior, es evidente además que la ubicación de piezómetros solamente aguas arriba de la relavera no permitiría comprobar una eventual afectación posterior en las aguas subterráneas de aguas abajo, pues el diseño equivocado con ausencia de piezómetros aguas abajo no permitiría tener datos de línea base.

En diversos apartes del EsIA se ha insistido en la desconexión del sistema de páramo con la roca subyacente aduciendo argumentos hidrológicos (poco rigurosos) o señalando que el modelo numérico del agua subterránea – por abordar más adelante – predice una recarga de aproximadamente 1 % del total de la precipitación, lo cual la haría casi despreciable y reforzaría el argumento de la desconexión entre los dos sistemas. Bajo este escenario se esperaría que las características químicas del agua del "sistema profundo" sean radicalmente diferentes a las de las aguas subterráneas relacionadas con el páramo.

Lo anterior suposición es válida en cuanto las aguas subterráneas profundas deben tener una zona de recarga, que si no se encuentra en el páramo (o es prácticamente despreciable) debe ubicarse a una distancia del orden de kilómetros respecto al área de estudio (como mínimo). El flujo subterráneo a través de las rocas por grandes distancias debería brindar una marca química particular a estas aguas en términos del grado de mineralización, en contraste con las aguas poco profundas del páramo que tienen menor interacción con las rocas y se ven dominadas por las características del agua lluvia y la interacción química con el suelo.

Por supuesto, aunque esta suposición es válida, es sumamente improbable la hipótesis de una zona de recarga lejana para las aguas subterráneas "profundas" que se encuentran justo debajo del páramo, debido a que esta área se constituye precisamente en cabecera hidrológica de toda la región y no se identifican características hidrogeológicas particulares que constituyan una excepción al principio general de que la dirección del flujo de las aguas subterráneas - al igual que el de las aguas superficiales – responde en buena medida a las características topográficas.

El análisis preliminar de los datos de conductividad eléctrica contenidos en el EsIA no permite plantear un contraste evidente entre el "*agua subterránea poco profunda asociada al páramo*" y el "*agua subterránea profunda asociada a la roca*". Ya que la conductividad eléctrica se constituye en una medida indirecta del grado de mineralización del agua, dicho contraste debería ser muy marcado, de acuerdo con la suposición previamente expuesta.

No obstante, lo que revelan los datos de los monitoreos realizados en julio de 2017, octubre de 2018, enero de 2019, abril de 2019 y octubre de 2019, es que dicho contraste no existe y en cambio los valores globales de conductividad eléctrica se mantienen alrededor de 200 µS/cm, que corresponde a un valor relativamente bajo. Si bien no existen rangos específicos para la interpretación de la conductividad eléctrica (pues esta depende altamente del contexto particular del lugar de estudio), este parámetro tiene una relación directa con los Sólidos disueltos totales (TDS), de tal manera que los TDS en mg/L siempre son una fracción de la conductividad eléctrica

expresada en µS/cm. Dicha fracción varía entre 0,55 y 0,9 (Clark, 2015)[97] de acuerdo con las características químicas del agua.

Los datos de TDS disponibles en el EIA no son claros y en algunos casos presentan inconsistencias como la presencia de valores mayores a la conductividad eléctrica (CE) expresada en µS/cm. Debido a lo anterior, los datos de CE presentan un grado mayor de fiabilidad y además se constituyen en un valor máximo posible para los TDS. Si se tiene en cuenta lo anterior, es posible apreciar que sin distinción todos los piezómetros presentan valores típicos de aguas subterráneas superficiales o con poco tránsito, sugiriendo que el área de recarga es cercana.

PUNTO	CE PROMEDIO
LLDHG-010A	20,8
LLDHG-009A	115,6
LLDHG-014	203,5
LLDHG-009	186,2
LLDHG-010	105,6
LLDHG-013	205,5
LLDGT-006	186,2
LLDHG-003C	289

TABLA 6. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA PROMEDIO DEL AGUA SUBTERRÁNEA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[98]

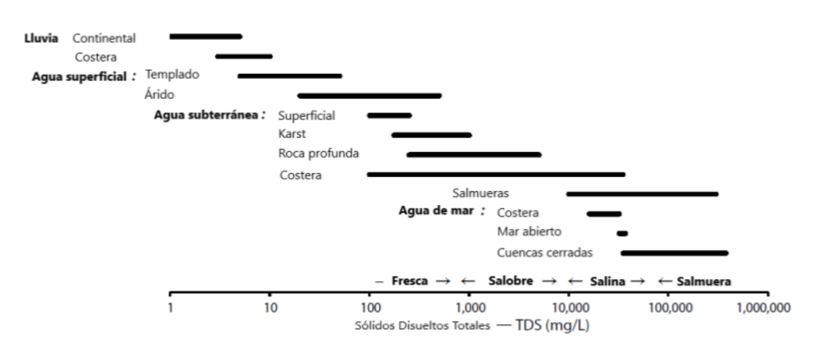


FIGURA 48. ARRIBA: VALORES PROMEDIO DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (µS/CM) PARA ALGUNOS PIEZÓMETROS DEL ÁREA DE ESTUDIO. ABAJO: RANGOS TÍPICOS DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES PARA DIFERENTES TIPOS DE AGUA. FUENTE: MODIFICADA DE CLARK (2015)[99]

En términos espaciales no fue posible evidenciar un patrón en la distribución espacial de la conductividad eléctrica, en parte porque todos los piezómetros se restringen a un área con un diámetro de 1,5 kilómetros, totalmente insuficiente para evidenciar este tipo de relaciones. Sin embargo, sí se identificó una tendencia leve en la variación de la conductividad eléctrica como

[97] Clark, I. (2015). *Groundwater geochemistry and isotopes*. CRC press.
[98] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.
[99] Clark, I. (2015). *Groundwater geochemistry and isotopes*. CRC press.



función de la profundidad del nivel freático. Esta relación permite sugerir una evolución química del agua en la dirección vertical de flujo, y contrario a las afirmaciones del EsIA, permiten postular una hipótesis simple de evolución típica del agua que se infiltra para recargar el sistema de agua subterránea a profundidad.

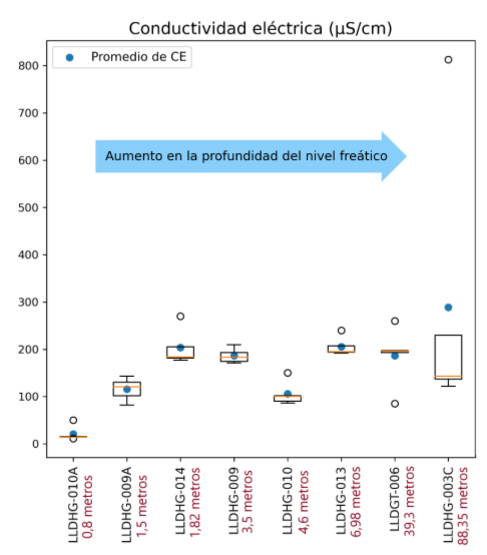


FIGURA 49. VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[100]

De la anterior figura hay que señalar que solo existe un valor por encima de 800 µS/cm medido en el piezómetro LLDHG-003C durante el monitoreo de julio de 2017. Sin embargo, este valor se constituye en un valor estadísticamente anómalo respecto a los medidos en las cuatro campañas de monitoreos subsiguientes.

Aunque el grado de mineralización del agua subterránea (reflejado en los valores de conductividad eléctrica) ya sugiere el predominio de aguas con poco tránsito y muy probablemente relacionadas a la recarga local (incluso para el "*sistema de aguas subterráneas asociado a la roca profunda*"), el análisis de la abundancia relativa de iones mayores brinda herramientas adicionales para establecer el grado de evolución química de las aguas subterráneas. Al respecto, en el ampliamente difundido trabajo de Chebotarev (1955)[101] se llega a la conclusión de que a medida que aumenta el tránsito del agua subterránea por el subsuelo, la composición química tiende hacia la composición del agua de mar. Esta transición también se ve acompañada por algunos cambios en los aniones predominantes en el agua:

[100] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.

[101] Chebotarev, I. I. (1955). Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. Geochim. Cosmochim. Acta, 8, pp. 22-48, 137-170, 198-212.

Tránsito a lo largo de una trayectoria de flujo →

$$HCO_3^- \longrightarrow HCO_3^- + SO_4^{2-} \longrightarrow SO_4^{2-} + HCO_3^- \longrightarrow SO_4^{2-} + Cl^- \longrightarrow Cl^- + SO_4^{2-} \longrightarrow Cl^-$$

Aumento de la "edad" →

FIGURA 50. CAMBIOS EN LOS ANIONES PREDOMINANTES EN EL AGUA SUBTERRÁNEA A MEDIDA QUE AUMENTA EL TIEMPO DE TRÁNSITO POR EL SUBSUELO. FUENTE: MODIFICADA DE FREEZE & CHERRY (1979)[102]

El ion bicarbonato (HCO_3^-) se relaciona principalmente con el dióxido de carbono (CO^2) presente en el suelo como consecuencia de la respiración de organismos o la descomposición de materia orgánica. Una vez el CO^2 reacciona con el agua forma ácido carbónico (H_2CO_3) que a su vez se puede disociar parcialmente en iones bicarbonato (HCO_3^-) y facilitar la disolución de este anión contenido en minerales como la calcita o la dolomita, cuando están presentes.

Por otra parte, el ion sulfato (SO_4^{2-}) proviene de la descomposición de materia orgánica en el suelo, la oxidación de sulfuros y principalmente de la disolución de minerales como la anhidrita o el yeso. Si bien estos minerales no están ampliamente distribuidos en la mayor parte de entornos geológicos, si tienen una solubilidad muy alta. Finalmente, el ion cloruro (Cl^-) solo se encuentra en concentraciones traza en la mayoría de las rocas, y por lo tanto se requieren grandes tiempos de tránsito en el subsuelo para disolver cantidades significativas en el agua subterránea. Por otro lado, los cationes dominantes en el agua subterránea no se constituyen en un indicador fiable que permita establecer la evolución química del agua, ya que la secuencia puede tomar múltiples direcciones en función del contexto geológico.

En este punto es importante mencionar que la llamada secuencia de Chebotarev aplica principalmente para entornos o cuencas con predominio de rocas sedimentarias, mientras que, en entornos con predominio de rocas ígneas (como el del proyecto Loma Larga) compuestas por sílice y aluminosilicatos, la secuencia pierde relevancia. Lo anterior se explica en el hecho de que en este tipo de entornos no existirían fuentes significativas de sulfato (SO_4^{2-}) o cloruro (Cl^-) que permitan que a medida que aumenta el tránsito del agua subterránea estos aniones se hagan predominantes (Freeze & Cherry, 1979).

Sin embargo, para el contexto geológico del área de estudio se identifican ciertas condiciones particulares que permiten matizar este principio. Está claro que el suelo se mantiene como una fuente de bicarbonato (HCO_3^-) aun cuando no existe disponibilidad de minerales como la calcita o la dolomita. En el caso de los sulfatos (SO_4^{2-}) no hay fuentes de minerales evaporíticos con alta solubilidad como la anhidrita o el yeso, pero la oxidación de sulfuros puede ser una fuente importante que permita la disponibilidad de este anión en el agua. Algunas evidencias para postular que este proceso de oxidación puede ser relevante son:

1) El contexto geológico, donde existe una mineralización que permite que los sulfuros sean abundantes.

2) La presencia de oxígeno disuelto en el agua (en cierta proporción respecto al porcentaje de saturación) en casi la totalidad de muestras, incluyendo los pozos que monitorean los niveles

[102] Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice-hall.



freáticos más profundos. Las únicas muestras donde no se halló ninguna disponibilidad de oxígeno disuelto corresponden a los piezómetros profundos *LLDHG-003C y LDGT-006* durante la campaña de monitoreo de 2017. Como se verá más adelante, una de estas muestras se constituye en la única donde el sulfato sustituye al bicarbonato (HCO_3^-) como anión predominante, lo cual es significativo una vez que se confirma que debe existir alguna fuente de sulfato (SO_4^{2-}), que además puede estar relacionada con el agotamiento del oxígeno en el agua. La disponibilidad de oxígeno es uno de los mecanismos que permite la oxidación de los sulfuros.

3) La correlación, si bien poco marcada, entre la concentración de sulfato (SO_4^{2-}) y los pH reportados en el EsIA. Dicha relación sería consecuente con la oxidación de sulfuros para generar sulfatos, pero también con la generación de ácido sulfúrico como subproducto que puede relacionarse a un pH más ácido. Cabe señalar que la tendencia se establece únicamente de manera gráfica y que existen algunos valores que no se ajustan a ella.

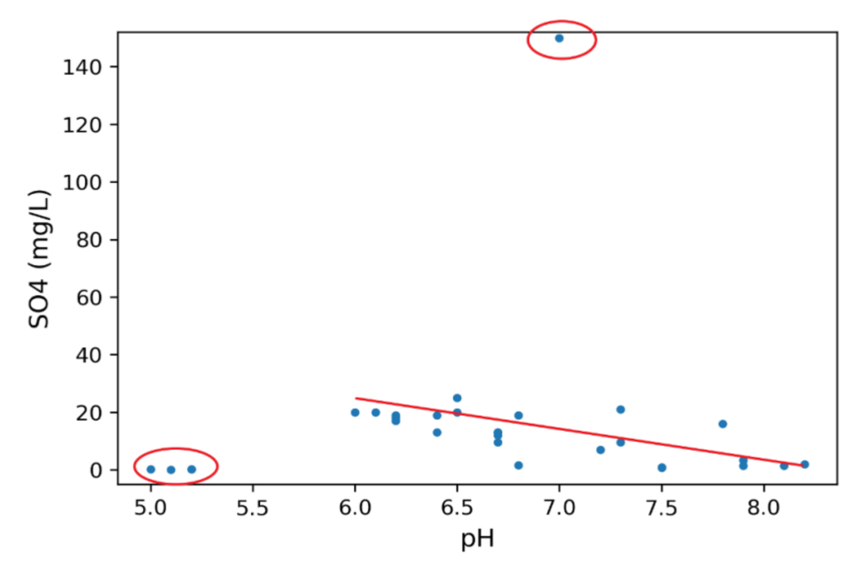


FIGURA 51. RELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE SULFATO Y EL PH DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[103]

En relación con lo anterior, hay que tener en cuenta que la evolución química "normal" del agua subterránea que transita por rocas cristalinas y cuya acción se relaciona a la alteración de feldespatos y micas (principalmente), es un aumento ligero en el pH y el ión bicarbonato (HCO_3^-) asociado a las reacciones de alteración (Freeze & Cherry, 1979)[104]. Por esta razón es aún más significativo que el sulfato (SO_4^{2-}) participe como un anión relevante en la composición del agua subterránea en el caso de Loma Larga, pues en condiciones normales no se plantean fuentes significativas y por el contrario el ión bicarbonato (HCO_3^-) debería ser cada vez más dominante.

[103] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.
[104] Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice-hall.

4) Las concentraciones en el agua subterránea de metales o metaloides contenidos en la estructura del sulfuro enargita (As, Cu) sugieren que de manera natural se presenta liberación de algunos de estos elementos, muy probablemente relacionada a la oxidación de sulfuros.

Para finalizar, el ion cloruro (Cl^-) seguiría constituyéndose en un elemento traza con muy alta solubilidad cuya presencia en concentraciones significativas indicaría grandes tiempos de tránsito en el subsuelo. Dado lo anterior, es posible que la secuencia de Chebotarev aún sea útil para evaluar las condiciones de tránsito del agua subterránea en el área de estudio, considerando que la oxidación de sulfuros es un proceso significativo que puede suplir de alguna manera la ausencia de fuentes naturales de sulfato (SO_4^{2-}) y es proporcional al tiempo de interacción del agua con la roca, además de presentarse de manera posterior a la interacción del agua con el suelo y el consecuente enriquecimiento en bicarbonato (HCO_3^-). Sin embargo, es necesario señalar las limitaciones de esta suposición e indicar que la oxidación de los sulfuros es un proceso diferente a la disolución de minerales sulfatos y tiene otros factores limitantes como la disponibilidad de oxígeno o la presencia de bacterias que puedan oxidar los sulfuros bajo condiciones anaeróbicas.

Planteadas las limitaciones, se presentan gráficamente los resultados de los monitoreos de julio de 2017, octubre de 2018, enero de 2019 y abril de 2019 a través de los diagramas hidrogeoquímicos de Piper y Stiff, los cuales permiten establecer una clasificación a partir de los iones mayores presentes en el agua y las concentraciones relativas de cada uno de ellos. En el EsIA solo se presenta el análisis de los resultados del monitoreo de julio de 2017, donde el piezómetro *LLDHG-003C* presenta un comportamiento particular respecto al grado de mineralización (asociado a una conductividad eléctrica de 800 µS/cm), que no se repite en los monitoreos subsiguientes.

El primer aspecto para considerar es que **no hay una diferencia marcada** en la composición química de las aguas subterráneas del "sistema de páramo" y del "sistema de roca profundo". Casi invariablemente las aguas corresponden a *aguas bicarbonatadas cálcicas* o *bicarbonatadas sódico potásicas,* siendo la única excepción el piezómetro *LLDHG-003C* (el más profundo) cuyas aguas se ubican en la zona de transición entre *aguas bicarbonatadas* y *aguas sulfatadas,* indicando un mayor grado de evolución química que no plantea una diferencia radical entre el agua más somera y la más profunda, sino una evolución gradual.

En lo que respecta a los aniones dominantes (triángulo ubicado en la parte inferior derecha) existe un predominio del bicarbonato (HCO_3^-) asociado a las aguas de recarga que atraviesan el suelo, mientras algunas muestras exhiben un mayor grado de evolución con proporciones más altas de sulfato (SO_4^{2-}) relacionadas a un mayor grado de interacción química con la roca. En el caso de las muestras que monitorean las aguas subterráneas "profundas" existen aumentos mínimos en la concentración de cloruro (Cl^-) consistentes con una evolución química gradual, al no constituirse este en un anión dominante.



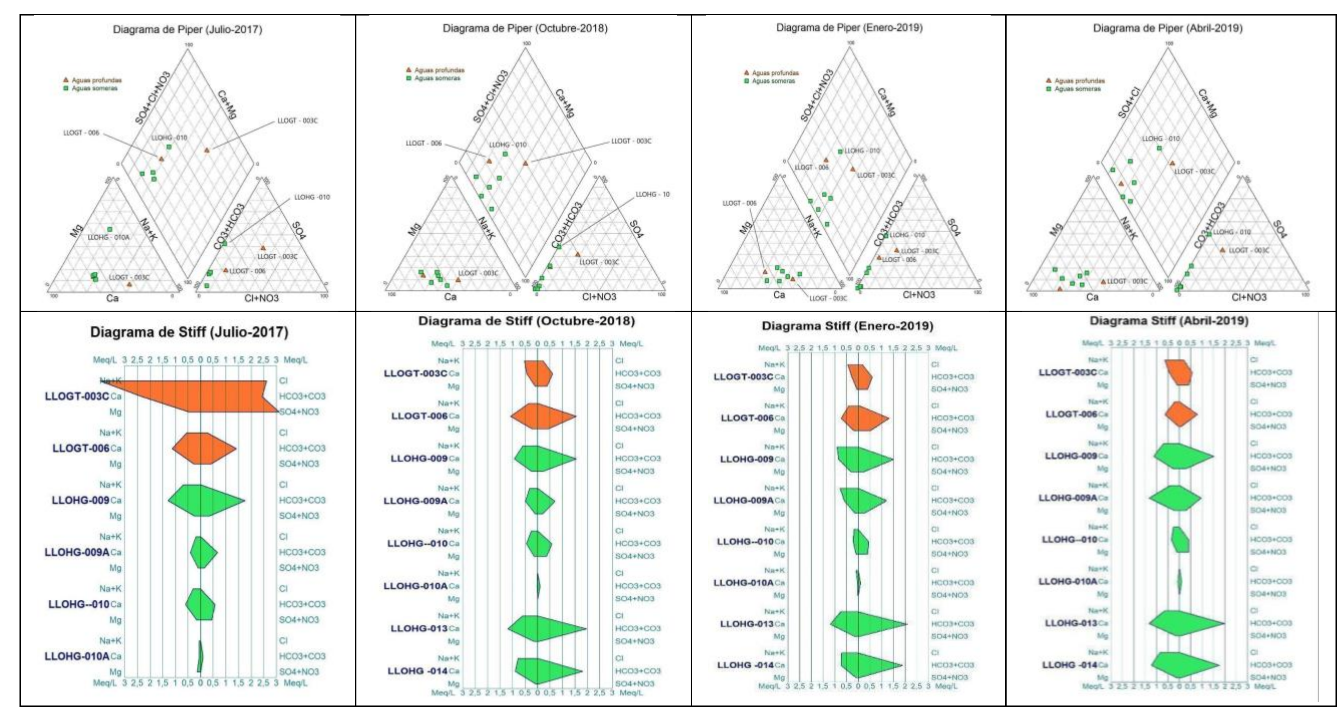


FIGURA 52. DIAGRAMAS HIDROGEOQUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA PRESENTE EN EL ÁREA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[105]

En síntesis, el grado de mineralización (reflejado en la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales) y la concentración de iones mayores, no apoyan la hipótesis de dos subsistemas de agua subterránea aislados, y por el contrario sugieren que existe una relación entre ambos soportada por un aumento gradual en la evolución química del agua a profundidad, lo cual es coherente con la ocurrencia de una recarga local. No obstante, existen incertidumbres que la empresa minera debió resolver en su EsIA a través de la realización de análisis isotópicos que permitan establecer el tiempo de tránsito del agua por el subsuelo. Lo anterior considerando que la desconexión entre el páramo y la roca profunda es la hipótesis principal de su modelo hidrogeológico y a lo largo de todo el estudio no se brindan evidencias de que tal desconexión exista.

Algunos datos adicionales relacionados con el grado de mineralización del agua (representada en la conductividad eléctrica) fueron recolectados en campo por TERRAE. El levantamiento de información se realizó utilizando multiparámetros Hanna HI 98129 debidamente calibrados. Aunque fue posible establecer cierto aumento en la conductividad eléctrica de los manantiales identificados en el área en dirección general de la topografía, la magnitud en la variación de la conductividad (que se mantiene en un rango muy bajo) no es lo suficientemente contundente para plantear una relación entre los manantiales superficiales identificados en el páramo y los manantiales de descarga asociados a los valles de las quebradas donde aflora la formación Turi. A pesar de esto, la presencia de estos manantiales en sí misma es diciente de una dinámica de las aguas subterráneas,

[105] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



donde éstas probablemente se recargan en la zona de páramo y descargan en las partes más bajas de valles profundos.

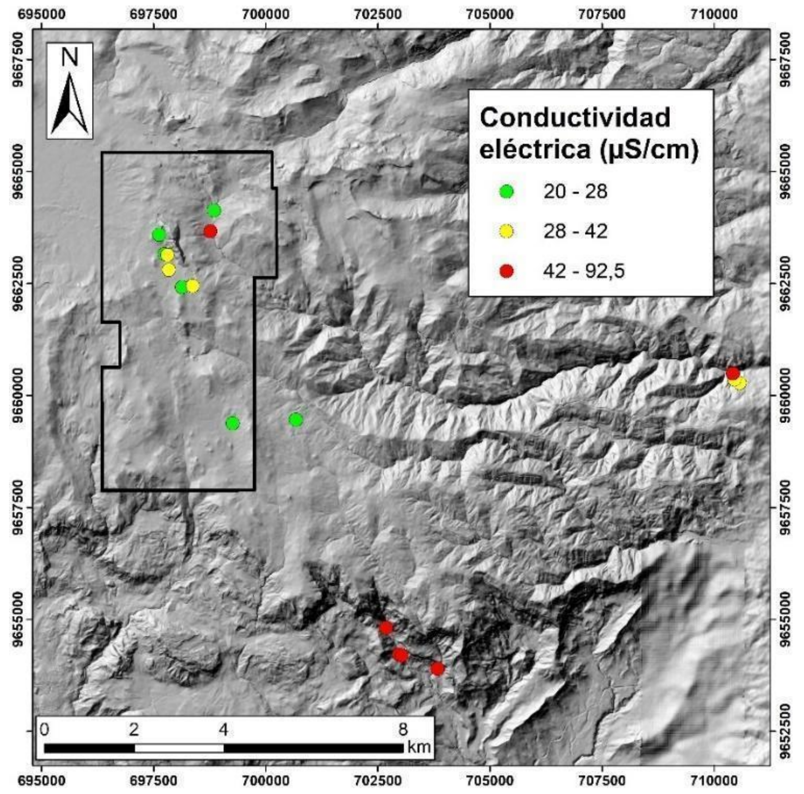


FIGURA 53. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA MEDIDA EN MANANTIALES POR TERRAE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Adicionalmente, algunos de estos manantiales parecen tener una alta relación con zonas donde el gradiente geotérmico aumenta, ya sea por la profundidad o en asociación a zonas de deformación. En cualquiera de los dos casos, se evidencia una relación estrecha con la roca y la importancia de flujos de agua subterránea profundos. En la siguiente imagen se ilustra la presencia de un manantial identificado en campo, en la parte baja del río Irquis. Este manantial presentaba una temperatura de 18° C, muy contrastante con la temperatura de 11° C medida en el río, evidenciando la marcada influencia termal.

Como ya se indicó anteriormente, este tipo de manantiales ni siquiera son tenidos en cuenta en el EsIA del proyecto Loma Larga y mucho menos se discuten particularidades tan importantes como la influencia termal.





FOTOGRAFÍA 4. MANANTIAL EN ROCA CON MARCADA INFLUENCIA TERMAL. FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA (2022)

2.5 El modelo numérico hidrogeológico de la empresa minera

Los modelos numéricos de aguas subterráneas son herramientas que facilitan la conceptualización e interpretación de las dinámicas hidrogeológicas desde un punto de vista cuantitativo, permitiendo la resolución de múltiples problemas y simplificando sistemas complejos para comprender sus aspectos más importantes (Anderson, Woessner & Hunt, 2015)[106]. Dicho esto, su construcción requiere contar con la experticia necesaria para traducir las características de la realidad en parámetros cuantitativos y además observar si los resultados guardan coherencia con las observaciones directas.

En relación con lo anterior, el modelo hidrogeológico conceptual es de suma importancia y se constituye en el insumo básico de un modelo numérico. Como se ha expresado en este informe, el entendimiento del sistema de aguas subterráneas generado por la empresa en su EsIA es casi inexistente y se sustenta en apreciaciones y opiniones más que en datos y evidencias concretas, lo cual se expresa en hechos como el de postular una desconexión del sistema de páramo con las aguas subterráneas profundas, aun cuando las evidencias hidrológicas o hidrogeoquímicas no son contundentes o incluso van en contravía de dicha hipótesis.

El EsIA no solo carece de un modelo hidrogeológico conceptual coherente, sino que además no cuenta con datos que permitan sustentar las aseveraciones que se realizan. Bajo este escenario es poco probable que se puedan llevar a cabo de manera satisfactoria etapas fundamentales de la modelación numérica como la calibración o la validación de los resultados.

Para demostrar la insuficiencia en la cantidad y calidad de la información solo hace falta observar algunas características del modelo numérico planteado en términos de su extensión espacial. En el polígono rojo se ilustra el dominio de modelación propuesto, el cual se puede comparar con el área para el que la empresa cuenta con información geológica (polígono negro) o con los puntos en los

106 Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*.

Transversal 15B No. 46 – 16 Of. 506 Tel: 340 24 62 Bogotá D.C., Colombia
info@terraegeoambiental.org

cuales realizaron pruebas hidráulicas (ensayos de Lugeon). Estos últimos puntos también incluyen aquellos donde se tienen datos sobre la posición del nivel freático.

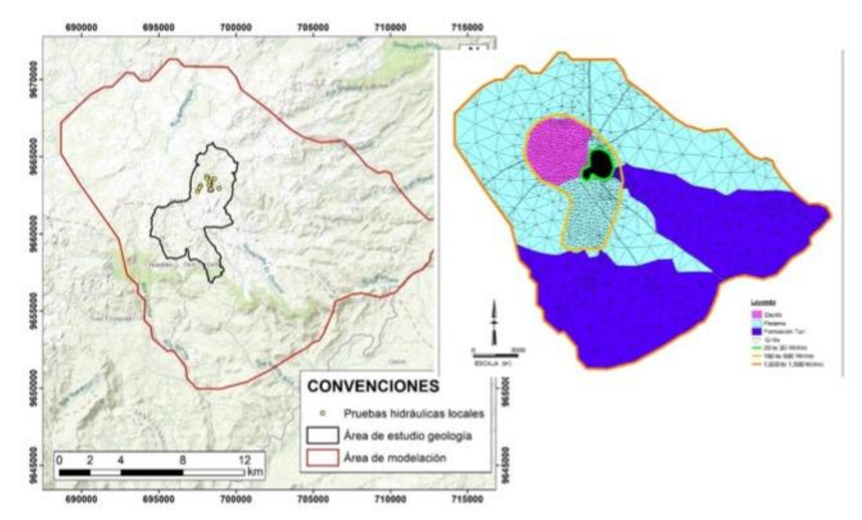


FIGURA 54. COMPARACIÓN DEL DOMINIO DE MODELACIÓN NUMÉRICA CON EL ÁREA PARA LA QUE SE CUENTA CON INFORMACIÓN GEOLÓGICA O HIDRÁULICA. LOS DATOS SE UBICAN EN UN ÁREA CORRESPONDIENTE AL 1 % DEL ÁREA TOTAL MODELADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[107]

Es apenas evidente la imposibilidad de llevar a cabo prácticas rigurosas de modelación numérica cuando la información se restringe a un pequeño sector del dominio considerado. La concentración de puntos de medición de datos hidrogeológicos en un área que corresponde al 1 % del área total de modelamiento es completamente antitécnico, carente de peso estadístico y espacial y genera resultados con temeridad en sus conclusiones.

Las afirmaciones de la empresa respecto al cumplimiento de los pasos necesarios para realizar un modelo numérico no son ciertas y se pueden resumir en las siguientes inconsistencias:

1) No existe claridad en las condiciones de contorno impuestas al modelo, las cuales deben asignarse con alguna justificación derivada del conocimiento geológico, pedológico e hidrogeológico que se tiene de la región.

2) No hay claridad en la asignación de parámetros hidráulicos a las unidades hidrogeológicas representadas en el modelo. Si bien se realizaron pruebas de Lugeon, los resultados de conductividad hidráulica reportados en el EsIA varían en algunos ordenes de magnitud (entre 10^{-9} y 10^{-6} m/s lo que es igual a la diferencia entre 1 y 1000) y no es claro cuál es el valor que finalmente se asignó como representativo para la formación Quimsacocha. Adicionalmente, se desconoce cuál es el criterio para proponer otra unidad hidrogeológica coincidente con la formación Turi (en azul oscuro en la anterior figura), no es evidente cuáles valores de conductividad hidráulica se asignaron a esta unidad y mucho menos cuáles son las pruebas hidráulicas que los sustentan.

[107] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



3) No se indica cuál fue el proceso de calibración que se llevó a cabo. Dicho proceso consiste en variar los parámetros del modelo (dentro de límites que sean coherentes con el modelo conceptual), de tal forma que se llegue a la combinación que mejor se ajuste a los datos reales (niveles freáticos, caudales, etc.) con los que se cuenta. Aun desconociendo cómo se realizó este proceso, se puede afirmar con seguridad que los resultados no son significativos, pues solo existen datos de niveles freáticos para un pequeño sector del área de modelación, sin mencionar que dichos datos corresponden a registros únicos en el tiempo.

Debido a esta característica estática y aislada de los datos de nivel freático, y a que no existen pruebas hidráulicas con escalas espaciales y temporales más amplias (como las pruebas de bombeo) se puede afirmar con seguridad que no hubo calibración para el modelo en estado transitorio, que es precisamente el que supuestamente puede predecir el abatimiento de los niveles freáticos a causa de la excavación subterránea.

4) No existió un análisis de sensibilidad que permitiera establecer cuál es el efecto de variar los parámetros asignados al modelo sobre sobre las predicciones que este es capaz de hacer. Dicho análisis es de gran importancia para escenarios como el de máximo abatimiento ¿Pueden pequeños cambios en la conductividad hidráulica aumentar sustancialmente la extensión del cono de abatimiento? Como se verá más adelante, existen argumentos contundentes para afirmar que el tipo de ensayos hidráulicos realizados (ensayos de Lugeon) subestiman en gran medida los valores de conductividad hidráulica representativos para una escala regional.

La totalidad de las inconsistencias señaladas están fundamentadas en los principios más básicos de modelación numérica de aguas subterráneas (Anderson, Woessner & Hunt, 2015)[108] y particularmente en guías como las desarrolladas por el Ministerio de Ambiente de Canadá y la provincia de British Columbia para la modelación de los impactos sobre el agua subterránea derivados de actividades extractivas (Wels et al., 2012)[109].

Está claro que la empresa Dundee Precious Metals (con sede en Toronto, Canadá) no cumple las guías mínimas de su país, poniendo en tela de juicio sus principios de responsabilidad corporativa y buenas prácticas ambientales.

Uno de los aspectos más importantes en la realización de un modelo numérico de las aguas subterráneas es establecer de manera muy clara las preguntas que se esperan resolver. El EsIA se propone simular los siguientes aspectos de la dinámica hidrogeológica:

- *El porcentaje de precipitación que alcanza el nivel freático a través de la recarga,*
- *El flujo de agua, cómo esta se mueve a través del subsuperficie*
- *Interacción con las operaciones mineras propuestas,*
- *Descarga de agua subterránea a ríos o quebradas cerca del sitio, y*

---

[108] Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*.

[109] Wels, C., Mackie, D., & Scibek, J. (2012). Guidelines for groundwater modelling to assess impacts of proposed natural resource development activities. Ministry of Environment, Water Protection & Sustainability Branch.

- *Reducción del nivel freático del sistema de aguas subterráneas profundas debido al drenaje de la mina.*

En lo relacionado al tema de la recarga proveniente de la precipitación, en el EsIA se adopta una posición simplista que consiste en permitir que el software de modelación utilizado (MINEDW) calcule el porcentaje de precipitación que se convierte en recarga como función de un parámetro de elevación. La ecuación que utiliza el software para el cálculo de la recarga es la siguiente, de acuerdo con la documentación disponible en línea, es[110]:

$$\text{Recarga} = P * EF = [(A + B * z^{c}) * EF]$$

Donde:
A = Intercepto [L/T]
B = Constante [L^{-c}]
c = Factor de escala no lineal [−]
z = Elevación [L]
EF = Factor de elevación [−]

En el EsIA no hay ninguna explicación que permita entender cómo se asignaron o calcularon estos valores, pero lo más relevante es la subjetividad que involucra el “Factor de elevación”, parámetro que **el modelador debe asignar** para establecer qué porcentaje de la precipitación se convierte en recarga, de acuerdo con la ecuación previamente ilustrada. Lo anterior implica que este “Factor de elevación” es un parámetro asignado de manera completamente arbitraria y subjetiva, lo cual es de extrema gravedad ya que en el EsIA no se menciona el valor que se utilizó ni los soportes que justifiquen su elección.

A pesar de ello, los autores del estudio insisten en afirmar que el modelo numérico de las aguas subterráneas “*calculó*” o “*dio como resultado*” que el porcentaje de precipitación que se convierte en recarga es del 1 %. Dicha afirmación falta a la verdad porque la recarga es en realidad un parámetro de entrada o una condición de contorno del modelo (Healy, 2010)[111], de tal manera que es el modelador quién la asigna y no el modelo el que la calcula. La única posibilidad de obtener la recarga a partir de un modelo numérico es a través de un proceso de calibración adecuado o mediante modelación inversa, método no usado por la minera dadas sus carencias de información.

Esta afirmación falsa de la empresa minera plantea aún más dudas respecto a la hipótesis de la desconexión del sistema de páramo con las aguas subterráneas y le resta solidez a su propio modelo hidrogeológico conceptual, que evidentemente está muy soportado en el dato incorrecto de 1 % como valor representativo de la recarga proveniente de la precipitación.

El modelo numérico presentado en el EsIA está claramente enfocado en determinar cuál es la extensión del abatimiento generado por las potenciales excavaciones subterráneas. Dicho abatimiento depende predominantemente de las propiedades hidráulicas de las unidades, las

[110] https://www.documentation.minedw.com/index.html
[111] Healy, R. W. (2010). *Estimating groundwater recharge*. Cambridge university press.

cuales se obtuvieron de los ensayos de Lugeon, sin que exista claridad de cómo se asignaron finalmente los valores en el modelo.

Respecto a los ensayos de Lugeon hay que señalar que fueron desarrollados inicialmente por Maurice Lugeon en 1931, con el objetivo de identificar a una escala muy local las características hidráulicas del material sobre el que se iban a fundar obras subterráneas, de tal forma que se optimizara la cantidad de lechada de concreto necesaria para tales obras. En la actualidad, esta metodología es ampliamente usada dentro de la geotecnia y se encuentra contenida en las normas ISO y ASTM (ISO 22282-3 2012 y ASTM D4630-96 2008, respectivamente).

Sin embargo, en la literatura también se mencionan otras características de este ensayo, que incluyen su **carácter limitado** (en términos de extensión espacial), y su falta de idoneidad para ciertas aplicaciones hidrogeológicas. Al respecto, Vaskou et al. (2019)[112] afirman que:

> *Las pruebas Lugeon nunca deben sustituir a las distintas pruebas hidrogeológicas que tienen diferentes alcances. Las pruebas Lugeon, sin embargo, pueden usarse en la definición preliminar de unidades hidroestratigráficas. El cambio relativo de los valores de permeabilidad en LU proporciona una herramienta importante en la caracterización hidro estratigráfica de las unidades litológicas en profundidad. Si se requiere una caracterización hidrogeológica precisa, se deben planificar y realizar pruebas hidrogeológicas adaptadas a cada situación específica (por ejemplo, pruebas de bombeo y recuperación de acuíferos, pruebas de carga variable, slug test y otras). Estas pueden ser adicionales a las Lugeon. Las principales aplicaciones de la prueba Lugeon, como se describen aquí, están relacionadas con la investigación de la capacidad de absorción de agua del macizo rocoso y la estimación del coeficiente isotrópico equivalente de permeabilidad/conductividad hidráulica del macizo rocoso alrededor de cualquier pozo de prueba*[113] (traducción libre, original en la nota al pie)

Por tanto, es evidente la inconveniencia de utilizar los ensayos de Lugeon en aplicaciones como la caracterización de las propiedades hidráulicas de unidades rocosas a escala regional y mucho menos para asignar valores de conductividad en modelos numéricos que involucran grandes extensiones. Los métodos más avanzados y adecuados para la caracterización hidráulica requieren de bombeo por largos periodos de tiempo, tal como lo señalan Singhal & Gupta (2010) y Fetter (2018).

Adicionalmente, para el caso de medios fracturados la conductividad hidráulica se debe ponderar por el número de fracturas atravesadas por las perforaciones. Dado el predominio de fracturas sub verticales y la realización de perforaciones en esta misma dirección, es razonable pensar que los

---

[112] Vaskou, P, Quadros, E., Kanji, M., Johnson, T. & M. Ekmekci (2019) ISRM Suggested Method for the Lugeon Test. Rock Mechanics and Rock Engineering. Springer

[113] Lugeon tests should never be a substitute for distinct hydrogeological tests which have distinct scopes. Lugeon tests, however, can be used in preliminary definition of hydrostratigraphic units. The relative change of permeability values in LU provides an important tool in hydrostratigraphical characterisation of the lithological units with depth. If accurate hydrogeological characterisation is required, hydrogeological tests adapted to each specific situation should be planned and carried out (e.g., aquifer pumping and recovery tests, falling-head tests, slug tests and others). These can be in addition to the use of Lugeon tests. The main applications of the Lugeon test as described here are related to the investigation of the water absorption capacity of the rock mass and the estimation of the equivalent isotropic coefficient of permeability/hydraulic conductivity of the rock mass around any given testing borehole.



sondeos no tienen una dirección que asegure la intercepción con la mayor densidad de fracturas, lo que puede llevar a subestimar la conductividad hidráulica. A continuación, se presenta la orientación de las perforaciones donde se realizaron pruebas Lugeon:

Nombre	Inclinación	Dirección de inclinación
LLDGT-003	70	360
LLDGT-003B	80	60
LLDGT-004	60	90
LLDGT-005	70	270
LLDGT-006	60	45
LLDGT-007	70	225
LLDHG-008	60	225
LLDHG-011	75	360

TABLA 7. ORIENTACIÓN DE LAS PERFORACIONES DONDE SE REALIZARON ENSAYOS DE LUGEON. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON INFORMACIÓN DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[114]

Hasta el momento se ha señalado la falta de representatividad de los ensayos de Lugeon para caracterizar las propiedades hidráulicas más allá de la escala local (un par de metros), pero además es de gran importancia mencionar que los valores obtenidos a través de ensayos cuya representatividad espacial es muy reducida, son menores en órdenes de magnitud respecto a los que se obtendrían a partir de pruebas hidráulicas representativas para grandes extensiones (del orden de kilómetros) como las pruebas de bombeo.

Neuman (1994)[115] encuentra evidencias para soportar la hipótesis de que las propiedades hidráulicas como la conductividad, la permeabilidad y la transmisividad varían de acuerdo con la escala considerada. Es así, como los valores obtenidos a escalas locales no son representativos a escalas regionales, y además son menores con diferencias en órdenes de magnitud.

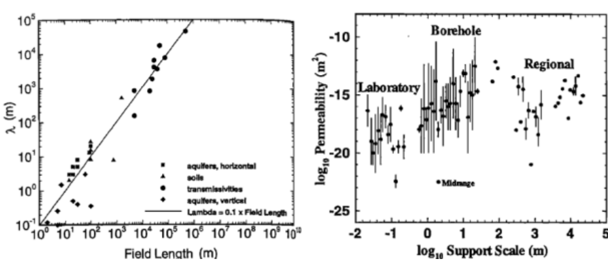


FIGURA 55. IZQUIERDA: CORRELACIÓN EXISTENTE ENTRE EL LOGARITMO NATURAL DE LAS CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS Y TRANSMISIVIDADES MEDIDAS EN VARIOS LUGARES (*Λ*), Y LA ESCALA DE MEDICIÓN CONSIDERADA (*FIELD LENGTH*), DE ACUERDO CON DATOS DE GELHAR (1993)[116]. DERECHA: RELACIÓN ENTRE EL LOGARITMO DE LAS PERMEABILIDADES OBTENIDAS EN ROCAS CRISTALINAS A DIFERENTES ESCALAS VS LOGARITMO DE LA ESCALA DE MEDICIÓN CONSIDERADA (*SUPPORT SCALE*). FUENTE: TOMADA DE NEUMAN (1994)[117]

[114] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.

[115] Neuman, S. P. (1994). Generalized scaling of permeabilities: Validation and effect of support scale. Geophysical research letters, 21(5), 349-352.

[116] Gelhar, L. W. (1993). Stochastic subsurface hydrology. Prentice-Hall.

[117] Neuman, S. P. (1994). Generalized scaling of permeabilities: Validation and effect of support scale. Geophysical research letters, 21(5), 349-352.



De la misma manera, Rovey & Cherkauer (1995)[118] evidencian un aumento en la conductividad hidráulica de algunos acuíferos de tipo kárstico en Wisconsin con el aumento en la escala considerada para la medición, representada en diferentes pruebas hidráulicas. De esta manera *S* corresponde a pruebas *Slug*, *Pi* corresponde a pruebas de inyección a presión (en esencia, pruebas tipo Lugeon), *sc* corresponde a pruebas de bombeo de corta duración, SC corresponde a pruebas de bombeo de larga duración, y M corresponde a la obtención de conductividad hidráulica a partir de la calibración de modelos digitales. La escala representativa de la prueba aumenta en el orden de mención y tiene una correlación directa con la conductividad hidráulica medida.

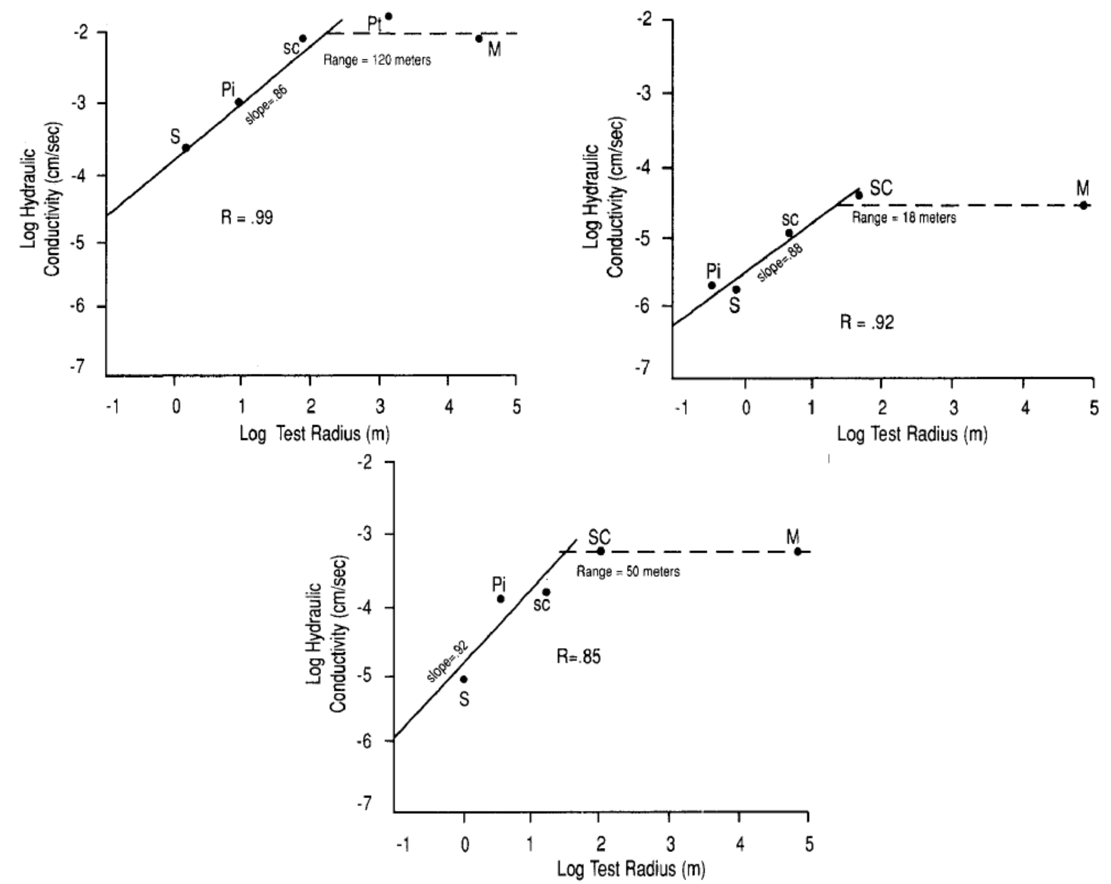


FIGURA 56. RELACIÓN ENTRE EL LOGARITMO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y EL RADIO EFECTIVO DE LA PRUEBA UTILIZADA PARA LA MEDICIÓN PARA DIFERENTES ACUÍFEROS KÁRSTICOS. FUENTE: TOMADA DE ROVEY & CHERKAUER (1995)

Esta dependencia entre la conductividad hidráulica y la escala de medición no discrimina entre el tipo de litología existente, pues Bradbury & Muldoon (1990)[119] evidencian la misma relación en

[118] Rovey, C. W., & Cherkauer, D. S. (1995). Scale dependency of hydraulic conductivity measurements. Groundwater, 33(5), 769-780.
[119] Bradbury, K. R., & Muldoon, M. A. (1990). Hydraulic conductivity determinations in unlithified glacial and fluvial materials (pp. 138-151). ASTM International.



depósitos fluviales y glaciales, mientras que Piña et al. (2019)[120] pueden establecer está variación para el caso de rocas cristalinas ígneas y metamórficas altamente fracturadas en la Cordillera Central de Colombia.

A la luz de estas evidencias es posible establecer que los ensayos de Lugeon no solo son inadecuados para caracterizar las propiedades hidráulicas a escalas regionales o semi regionales, sino que además las subestima. Esto tiene grandes implicaciones en los resultados del modelo numérico de las aguas subterráneas elaborado en el EsIA. Como se planteó en el marco de referencia, la extensión del cono de abatimiento generado por una excavación subterránea (como la explotación propuesta del proyecto Loma Larga) depende en gran medida de la conductividad hidráulica del medio. A partir de la recopilación bibliográfica realizada es posible observar que la conductividad asignada al modelo puede estar subestimada en varios órdenes de magnitud y por lo tanto el cono de abatimiento se extendería mucho más de lo predicho.

Esto último es de gran relevancia en términos de establecer los impactos potenciales a cuerpos de agua superficial. Bajo esta nueva perspectiva, la afectación predicha a la quebrada Quinuahuaycu (río Irquis) podría ser mucho mayor, así como también los caudales de ingreso previstos a la mina subterránea, con las implicaciones que esto tiene en la oferta hídrica, en las consideraciones geotécnicas y en los cálculos de los volúmenes de agua que deben ingresar a la planta de tratamiento de aguas.

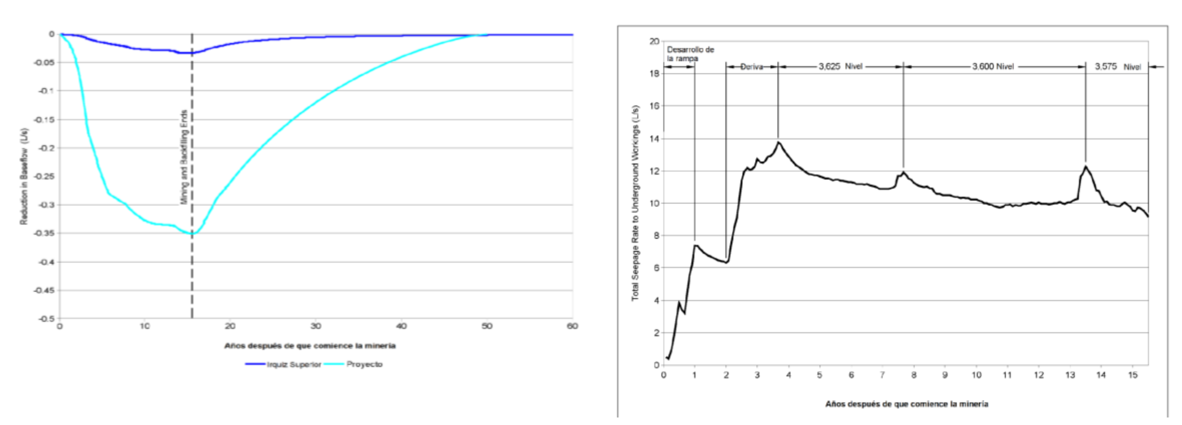


FIGURA 57. ARRIBA: REDUCCIÓN DEL CAUDAL DEL RÍO IRQUIS (MÁS ABAJO RÍO TARQUI) DEBIDO AL ABATIMIENTO GENERADO POR LA EXCAVACIÓN MINERA. ABAJO: VARIACIÓN EN EL TIEMPO DE CAUDALES DE ENTRADA A LA MINA SUBTERRÁNEA. MUY PROBABLEMENTE AMBOS CAUDALES ESTÁN SUBESTIMADOS ANTE LA DEFICIENCIA EN LA CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[121]

La subestimación de las propiedades hidráulicas de los materiales configura un escenario de alta incertidumbre en el que los impactos que podría generar la explotación no son claros. A esto se suma la falta de un análisis de sensibilidad del modelo (práctica común en la modelación de aguas

[120] Piña, A., Donado, L. D., & Blessent, D. (2019). Analysis of the scale-dependence of the hydraulic conductivity in complex fractured media. Journal of Hydrology, 569, 556-572.

[121] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



subterráneas, también referenciada en las guías desarrolladas por el Ministerio de Ambiente de Canadá y la provincia de British Columbia) que consiste en variar los parámetros de entrada del modelo y establecer la influencia que tienen en los resultados. Si este análisis de sensibilidad se hubiera realizado, los autores del EsIA habrían podido determinar cómo afectaría una variación de la conductividad hidráulica (dentro de un rango de órdenes de magnitud) las predicciones realizadas.

Finalmente, uno de los aspectos más importantes (si no el más importante) que el modelo numérico debe resolver está relacionado con las direcciones de flujo del agua subterránea. Como ya se ha indicado, la distribución de los piezómetros no es la adecuada para comprender el sistema desde una perspectiva regional. Además, a pesar de que se realiza un modelo con un dominio de más de 12 kilómetros de diámetro de extensión, tampoco se presentan los resultados que permitan evaluar hacia donde fluye el agua.

Esta inconsistencia ya se había expresado en el análisis del modelo hidrogeológico conceptual en relación con los posibles impactos sobre las comunidades cercanas al proyecto de explotación. **Ni el modelo conceptual ni el modelo numérico permiten determinar cuál es la trayectoria del agua que fluye en el subsuelo más allá del área de estudio subterránea impuesta arbitrariamente por la empresa**. De igual manera, ninguno de los modelos es claro en la definición de áreas de recarga y descarga de las aguas subterráneas.

En las siguientes secciones se abordan algunos de los posibles efectos de los abatimientos de los niveles de las aguas subterráneas sobre el colchón de agua del páramo si se llegare a permitir la actividad minera y las implicaciones que tiene el desconocimiento de las direcciones de flujo regional y de la relación del agua superficial - agua subterránea, sobre las consideraciones de transporte de contaminantes y riesgo de contaminación por la relavera.

2.6 El páramo como un gran sistema de recarga de la provincia de Azuay y sus comunidades

Algunos de los argumentos expuestos en este informe llevan a desarrollar la cartografía de la zona saturada, o este gran colchón de agua, conformado en la zona de páramo. Para identificarlo se aplicó un proceso basado en imágenes satelitales y validación en campo (ubicación de cuerpos de agua y extensión máxima de zonas inundables). Las variables consideradas son imágenes Sentinel 2 considerando principalmente las bandas 8, 4 y 3, para la fecha 2022-05-21, bandas asociadas del infrarrojo cercano, azul y roja. Con base en estas bandas se calcularon dos índices, uno de humedad asociado a la presencia de agua (NDWI) y otro asociado a la actividad de la vegetación (NDVI), las cuales son recomendadas para la identificación en conjunto de cuerpos de agua. Las expresiones consideradas son para el caso del satélite Sentinel 2 son las siguientes:

$$NDWI = B3\text{-}B8/(B3+B8)$$

$$NDVI = B8\text{-}B4/(B8+B4)$$



Para el análisis de dichas imágenes se tuvo en cuenta trabajos adelantados por Núñez et al. (2021)[122], en las que se han adelantado trabajo para establecer la correlación entre la vegetación, la diferentes franjas en las que predominan y el grado de saturación de la misma. Dichas correlaciones se encontraron también en el área del páramo de Quimsacocha como se muestra inicialmente para el caso del NDVI en la siguiente figura.

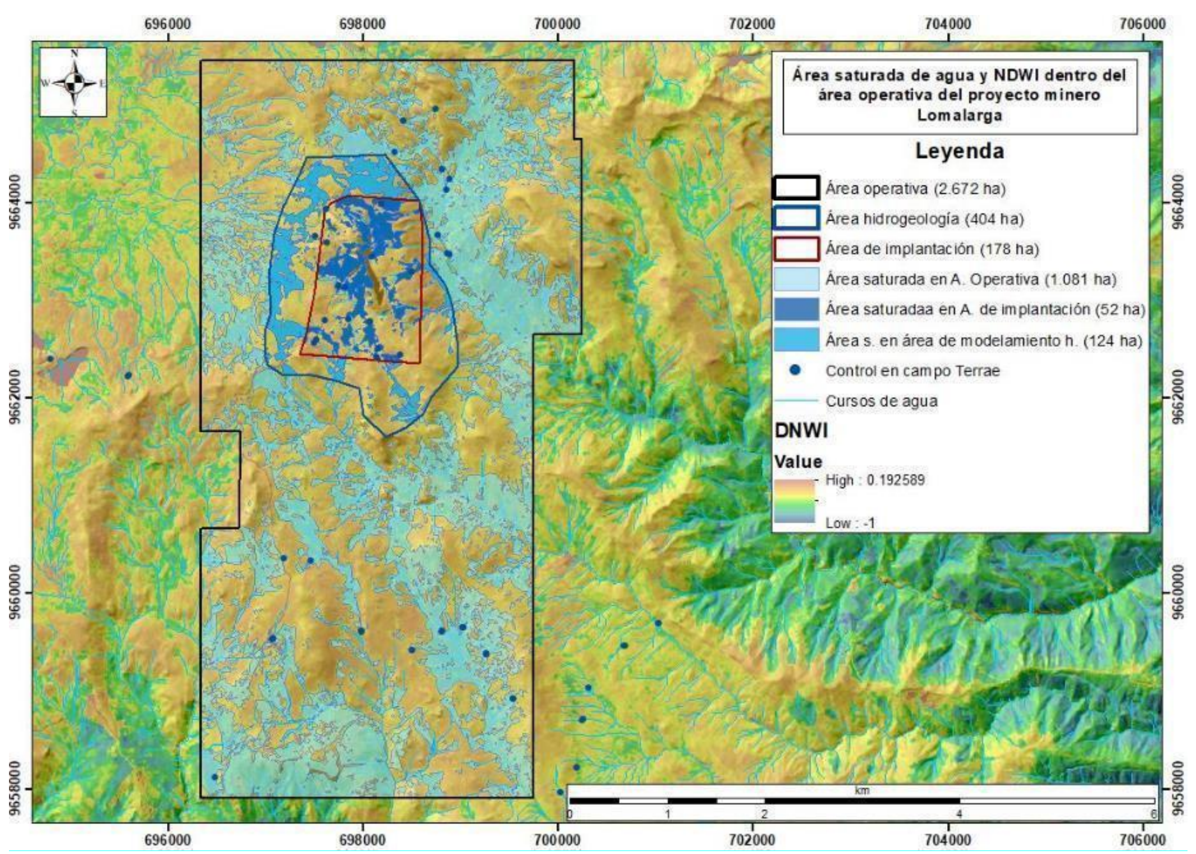


FIGURA 58. ÁREA SATURADA DE AGUA Y NDVI EN EL ÁREA OPERATIVA DEL PROYECTO LOMA LARGA Y ALREDEDORES. ELABORACIÓN PROPIA.

Con base en esta figura se puede ver que valores por encima de 0,4 se correlacionan con zonas en donde se tiene la presencia de colchones de agua (vegetación y suelos que por sus características se extienden por grandes zonas del páramo), limitados por los puntos de control levantados en campo. Adicionalmente el NDWI permite identificar las zonas con mayor presencia de agua, en este caso valores menores a -0,1 muestran correlación con las zonas saturadas, como se evidencia en la siguiente figura.

Además de analizar en conjunto estos dos índices y la pendiente de terreno, se cruzaron los índices con la información levantada en campo, con lo que se pudo definir la zona saturada, la cual tiene mayor incertidumbre en las zonas de pajonales. Esta área ha sido cruzada con tres áreas asociadas

[122] Núñez, J., Pizarro, S., Gutiérrez, M. & J. Ñaupari (2021). Dinámica espacio temporal de la biomasa aérea en pastizales altoandinos basado en NDVI-MODIS validado por espectrometría in situ. Rev Inv Vet Perú 2021; 32(3).



al proyecto: de implantación, operativa, y de modelamiento hidrogeológico. De estas áreas se puede ver como el área de modelación hidrogeológica (404) es una de las de mayor afectación puesto que en principio es la zona hasta donde se tendría la extensión máxima del abatimiento, y en la que por las condiciones de flujo preferencialmente vertical sería la zona directamente afectada ya que potencialmente se pondría en riesgo un área de páramo saturada (124 ha).

Teniendo en cuenta el área de modelación hidrogeológica saturada en riesgo (124 ha), se puede hacer una estimación del volumen en riesgo si se asume un espesor de lámina de 0,3 m (espesores que se mapean en campo), con esto se tiene un volumen de 372 000 m^3. Por otro lado, si se consideran los caudales de entrada (Figura 18) con un valor mínimo de 10 l/s (315 360 m^3/año) del año 3 al 15, se tendría un volumen demandado de 3 784 320 m^3. Este volumen es casi 10 veces más la capacidad estimada del colchón de agua ubicado en el páramo, lo que indica una presión notable sobre ese ecosistema y además resalta la incertidumbre de si la supuesta desconexión entre el páramo y el acuífero en la naturaleza es real.

Lo anterior es solo un ejemplo de cómo otros modelamientos permiten plantear por un lado la gran capacidad del páramo de regular y de recargar y por otra la amenaza que se cierne sobre este ecosistema y por ello se insiste en que un estudio para viabilizar una actividad que pueda ponerlo en riesgo necesita todo un conjunto robusto de estudios geológicos, geomorfológicos, hidroclimáticos, hidrogeológicos, ecosisémicos y socioculturales. Este no es el caso del EIA entregado por la empresa minera.

2.7 La ausencia de modelos de transporte de contaminantes y los riesgos de contaminación por la relavera

Como se había mencionado en apartes anteriores, es razonable pensar que el agua subterránea en el área de estudio fluye desde las partes topográficamente más altas hacia las más bajas, e incluso los mismos resultados del modelo numérico no permiten descartar la posibilidad de que alimente el flujo de las aguas superficiales, especialmente hacia las partes más profundas de los valles formados por las quebradas.

Entender cómo se mueve el agua en el subsuelo es de vital importancia, no solo para comprender las posibles afectaciones a la oferta hídrica derivadas de la actividad minera, sino también para predecir las posibles trayectorias que un contaminante presente en el agua puede seguir. En el EsIA se ignora cualquier consideración respecto a la liberación y transporte de contaminantes relacionados a la explotación, particularmente el arsénico.

Aun cuando en este EsIA se plantean medidas para reducir los riesgos de contaminación química, estos riesgos nunca son iguales a cero ni existen sistemas completamente cerrados que aseguren que en ninguna circunstancia se pueden liberar contaminantes al medio ambiente. Considerando lo anterior, es necesario que tanto para los modelos de flujo como los de transporte siempre se



simulen escenarios considerados críticos, tal y como lo disponen las guías de modelación canadienses (Wels et al., 2012)[123]

En el EsIA del proyecto Loma Larga es evidente que ni siquiera se consideró la liberación y el transporte de contaminantes como un posible impacto. En la literatura relacionada al desarrollo de modelos numéricos en este tipo de contextos se indica que, como mínimo, la modelación debe involucrar un procedimiento de rastreo de partículas (*particle tracking*) que muestre cuales serían las trayectorias que tomaría un contaminante de interés como respuesta al transporte advectivo, así como el tiempo que tardaría este en moverse de un lugar a otro. Sin embargo, se debe indicar que cada vez son más frecuentes en el mundo las normas regulatorias que exigen la aplicación de modelos de transporte de solutos (Smith, 2021)[124], mucho más complejos que los procedimientos de rastreo de partículas porque pueden involucrar otros mecanismos de transporte y muy posiblemente la modelación de las reacciones químicas que ocurren durante el tránsito del contaminante por el subsuelo.

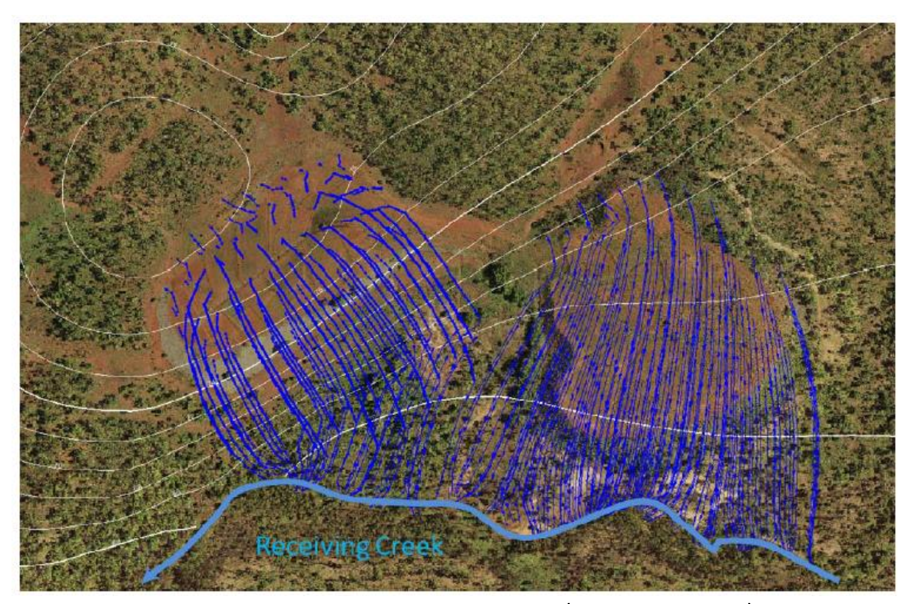


FIGURA 59. EJEMPLO DE UN PROCEDIMIENTO DE RASTREO DE PARTÍCULAS (*PARTICLE TRACKING*) UTILIZADO PARA ESTABLECER POSIBLES TRAYECTORIAS DE UN CONTAMINANTE EN EL AGUA SUBTERRÁNEA PROVENIENTE DE DOS FUENTES DIFERENCIADAS HACIA UN ARROYO. FUENTE: TOMADA DE WELS ET AL. (2012)[125]

Es evidente que en el EsIA no se llevó a cabo ninguno de estos procedimientos. No obstante, ante la ausencia de este tipo de información entran a desempeñar un papel importante dinámicas de la naturaleza que la empresa minera ha omitido (y que ya se han detallado en numerales anteriores): i) es razonable y normal que las aguas subterráneas se muevan desde las partes topográficamente

123 Wels, C., Mackie, D., & Scibek, J. (2012). Guidelines for groundwater modelling to assess impacts of proposed natural resource development activities. Ministry of Environment, Water Protection & Sustainability Branch.

124 Smith, L. (2021) Hydrogeology and Mineral Resource Development. Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2021.

125 Wels, C., Mackie, D., & Scibek, J. (2012). Guidelines for groundwater modelling to assess impacts of proposed natural resource development activities. Ministry of Environment, Water Protection & Sustainability Branch.



más altas hacia las más bajas, y ii) pueden existir aportes desde las aguas subterráneas al flujo de las aguas superficiales, situación que incluso admite el modelo numérico desarrollado por la empresa.

Si estos dos principios se consideran válidos, las implicaciones para el transporte de contaminantes son preocupantes. En primer lugar, todos los centros poblados y las comunidades de la provincia de Azuay se encuentran aguas abajo del proyecto minero. Como las velocidades de flujo en el subsuelo son relativamente bajas, no se esperarían impactos inmediatos en la calidad de las aguas subterráneas de algunas poblaciones, pero sí afectaciones a largo plazo, que además pueden ser muy persistentes.

Pero sin duda lo más preocupante es la posibilidad de que los potenciales contaminantes (principalmente el arsénico) contenidos en el agua subterránea puedan alcanzar las corrientes de agua superficial y estar presentes en el agua de consumo de las comunidades en un plazo mucho menor. Los resultados del modelo numérico presentado en el EsIA sugieren que esto puede ocurrir para el caso del río Irquis, que para dar un ejemplo se constituye en la captación para el Sistema Comunitario de Agua Tarqui – Victoria del Portete, como se pudo verificar en la visita de campo realizada en el marco del desarrollo de esta evaluación. A lo anterior hay que sumar el vertimiento de las aguas provenientes de la planta de tratamiento de aguas mineras (pobremente descrita) a la quebrada Alumbre. En el perfil es evidente como según el modelo el nivel de las aguas subterráneas "profundas" se encuentra en contacto con la capa de suelo e incluso descarga hacia la quebrada Quinuahuaycu (río Irquis).

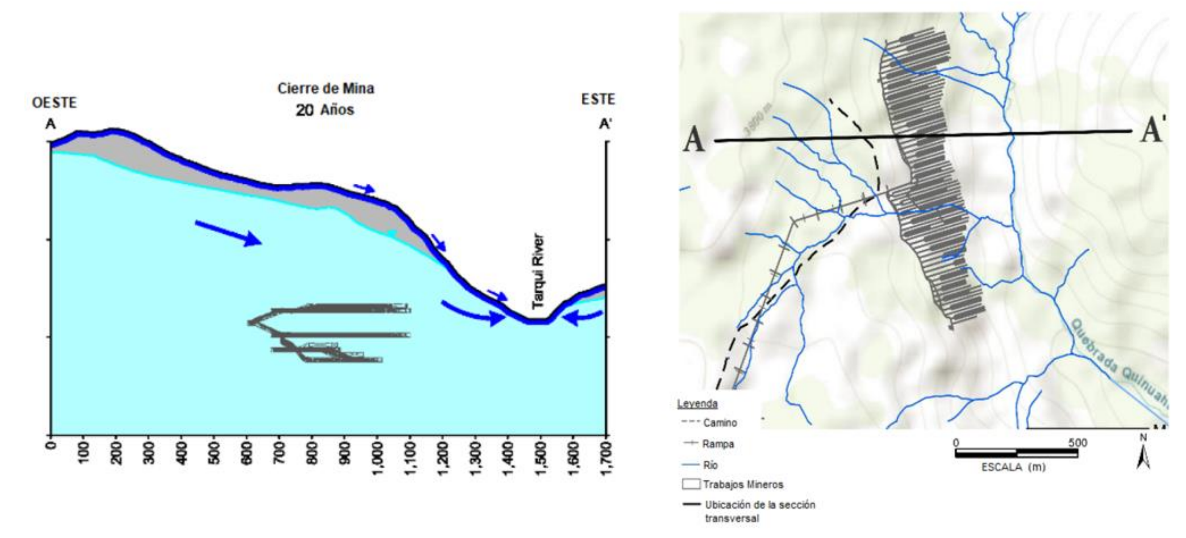


FIGURA 60. PERFIL DEL SISTEMA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL ESCENARIO POSTERIOR AL CIERRE DE MINA. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[126]

Teniendo en cuenta todas las observaciones realizadas en secciones anteriores, sumadas a la carencia de un modelo de transporte de contaminantes, es posible observar que **el modelo**

126 INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



numérico de las aguas subterráneas genera más incertidumbres que certezas respecto a los potenciales impactos del proyecto de explotación Loma Larga. Este modelo es de gran importancia porque es el que debería sintetizar e integrar la caracterización hidrogeológica realizada y llegar a identificar y cuantificar los posibles impactos del proyecto. En contraposición a este objetivo fundamental, lo que se logra observar es que es un modelo con graves errores y omisiones, del cual se sirve la empresa minera para obtener conclusiones falaces.

El modelo numérico, por lo tanto, es tan solo un reflejo de las graves falencias en la caracterización hidrogeológica básica y demuestra las reprochables conductas de la empresa Dundee Precious Metals, que se aprovecha de debilidades en la normativa ambiental ecuatoriana (la no existencia de términos de referencia sectoriales y detallados, por ejemplo) para realizar estudios que en su país de origen se considerarían insuficientes para la obtención de una licencia ambiental. Esto no es una sorpresa, puesto que ya Moran (2011)[127] había advertido que el Estudio de Impacto Ambiental presentado por esta misma empresa para el proyecto de explotación de oro Ada Tepe en Bulgaria, no sería aceptable en Canadá, Estados Unidos, Australia, y la mayoría de los países de Europa occidental.

Sin duda, uno de los puntos fundamentales dentro del EsIA es la conformación de la relavera y los riesgos que implica en términos de contaminación del agua. Esta relavera se proyecta para tener una vida útil de cerca de 12 años, con una capacidad de almacenamiento de 10,3 millones de toneladas, y una serie de actividades que implican el manejo de las aguas que puedan entrar en contacto con estos materiales. Un detalle del volumen de la relavera y cómo se distribuirá se detalla en el siguiente texto:

> *De acuerdo con el actual plan minero y el uso de los relaves como relleno en la mina, se asume que cerca de un 53 % de la producción total de relaves será depositada superficialmente en la relavera a lo largo de la LOM, alcanzando un total aproximado de 5,5 Mton secas de relaves filtrados; el 47 % restante de relaves producidos, equivalente a cerca de 4,8 Mton secas, serán depositados como relleno en la mina subterránea.* (Tomado de 7.2.4.1.1, subrayados fuera del texto)

En términos de las posibles afectaciones al agua subterránea, un enfoque preventivo debería ser el priorizado, con la prohibición del emplazamiento de relaves a cielo abierto. Existen suficientes antecedentes de contaminación de suelos y aguas subterráneas en el mundo, así como miles de muertos por el colapso de estas estructuras para actuar conforme el principio de precaución.

Pero incluso, si incumpliendo con dicho principio de precaución se permitiera una relavera, la primera actividad que se debe garantizar que la infiltración en el subsuelo sea nula a través de un adecuado sistema de impermeabilización que sea capaz de evitar cualquier contacto con el suelo (si es que eso es probable haciendo análisis en el largo plazo, pues estos desechos se disponen para siempre en el territorio); en el segundo caso, se deben monitorear las aguas subterráneas que entren en contacto con los relaves, tanto los enterrados como los dispuestos a cielo abierto.

[127] Moran, R. E. (2011) Ada Tepe Gold Deposit EIS, Krumovgrad, Bulgaria: Technical Comments.



Para los relaves depositados de manera superficial, se plantea una impermeabilización del suelo subyacente a la estructura y una impermeabilización total (incluyendo la superficie) luego de la etapa de explotación. Sin embargo, es claro que durante la etapa activa de la mina estos relaves van a quedar expuestos a la precipitación, con la consecuente oxidación de sulfuros, generación de drenaje ácido de mina y liberación de elementos como el arsénico.

Para manejar este tipo de aguas se propone un sistema de drenajes (que se postula como completamente impermeable sin que existan consideraciones del comportamiento en el largo plazo) que envía las aguas a una piscina exterior que las colecta para su posterior manejo en la planta de tratamiento de aguas. Respecto a la piscina exterior se afirma que:

> *La piscina exterior contará con un sistema de revestimiento de geomembrana doble con un sistema intermedio de colección y recuperación de fugas.* Tomado de 7.2.4.1.3.

Sin embargo, resulta preocupante la posibilidad de que el agua que llega a esta piscina después del contacto con los relaves sea utilizada como agua de proceso, aumentando la posibilidad de vertimientos accidentales:

> *Las aguas almacenadas en la piscina de colección de subdrenaje serán extraídas por medio de bombas y conducidas a las instalaciones de la planta de procesos para ser utilizadas como agua de proceso, o hacia la planta de tratamiento de aguas para su tratamiento y posterior descarga*

Respecto a esta planta no se brindan las especificaciones técnicas detalladas ni hay abordajes rigurosos que permitan conocer su efectividad, la cual supuestamente está acorde con pruebas cinéticas de liberación de contaminantes para las que se presentan algunos resultados, pero no la elaboración técnica o los análisis intermedios que llevaron a ellos.



Parte 1 de 2			
Parámetro (mg/L)	Baja	Base	Alta
pH	5,5	5,0	4,3
Ag	0,00010	0,00015	0,00020
Al	0,073	3,6	7,1
Alcalinidad	68	93	120
As	0,016	0,030	0,044
B	0,020	0,030	0,039
Ba	0,24	0,29	0,34
Be	0,00028	0,00036	0,00045
Bi	0,019	0,019	0,019
Ca	22	34	46
Cd	0,00038	0,00047	0,00056
Cl	9,6	49	89
Co	0,0015	0,0044	0,0087
Cr	0,00073	0,023	0,046
Cu	0,0053	0,0080	0,011
Cs	0,0013	0,0021	0,0029
F	0,10	0,13	0,16
Fe	9,0	20	36
Ga	0,00020	0,0012	0,0022
Gd	0,00010	0,00044	0,00077
Hf	0,00010	0,00020	0,00029
Hg	0,00010	0,00015	0,00020
Ho	0,00010	0,00015	0,00020
K	1,3	2,9	4,4
La	0,00010	0,0023	0,0044
Li	0,0061	0,021	0,036

Parte 2 de 2			
Parámetro (mg/L)	Baja	Base	Alta
Mg	3,0	4,1	5,2
Mn	0,78	0,97	1,17
Mo	0,0043	0,017	0,030
NH_3	0,77	1,49	2,21
NO_2^-	0,050	0,074	0,098
NO_3^{2-}	29	58	87
Na	12	48	85
Nd	0,00010	0,0022	0,0042
Ni	0,0013	0,0022	0,0056
O(0)	0	0	0
P	0,07	0,13	0,19
Pb	0,002	0,009	0,019
Rb	0,0046	0,0090	0,013
SO_4^{2-}	39	120	210
Sb	0,0090	0,0092	0,0093
Se	0,011	0,0111	0,012
Si	4,3	4,9	5,8
Sn	0,0030	0,0033	0,0036
Sr	0,15	0,28	0,40
Th	0,00016	0,00050	0,00084
Ti	0,0020	0,0021	0,0021
Tl	0,00010	0,00015	0,00020
U	0,00010	0,00053	0,00096
V	0,00020	0,00030	0,00039
Zn	0,019	0,086	0,292
Zr	0,00010	0,00039	0,00068

TABLA 8. QUÍMICA PREVISTA DEL AGUA DE DRENAJE DE LA MINA. FUENTE: TOMADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[128]

Luego del tratamiento, las aguas se verterían a la quebrada Alumbre. Hay que destacar la importancia de esta quebrada puesto que durante la visita de campo realizada en el marco de esta evaluación se identificó la presencia de valores de pH muy ácidos (cercanos a 4), que plantean una vulnerabilidad natural de este cuerpo para permitir la movilidad de metales pesados derivados de la explotación minera. Llama la atención la elección de este cuerpo de agua como receptor de los vertimientos sin ninguna justificación técnica, y es evidente la dificultad que plantearía monitorear los verdaderos impactos de contaminación en un cuerpo de agua que por naturaleza presenta valores de pH ácidos, y asimismo los valores más desfavorables en algunos parámetros de calidad del agua monitoreados y presentados en el EsIA, tales como el arsénico, el plomo, los sulfatos, la conductividad eléctrica, entre otros.

Es inevitable pensar en una estrategia de la empresa minera de realizar los vertimientos justo en esta quebrada, donde sería difícil distinguir los impactos de la minería de las características químicas naturales. Por otra parte, hacer vertimientos que tienen alta probabilidad de incluir metales pesados en un cuerpo de agua naturalmente ácido asegura la dispersión de dichos metales en el ambiente, muy por fuera de lo que se definió como área de influencia directa. Se necesitarían modelos de dispersión para tener soportes tanto para la definición del área de influencia como para plantear un plan de manejo ambiental responsable y ajustado a los peores escenarios.

Respecto al manejo de las aguas subterráneas, en el EsIA se indica:

128 INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



Manejo de Aguas Subterráneas

> *El sistema de manejo de aguas subterráneas incluye, entre otros, la instalación de drenes y tuberías corrugadas perforadas de polietileno de alta densidad (HDPE), para la colección de aguas, y de tuberías corrugadas no perforadas de HDPE, para conducir las aguas al exterior de la estructura; instalación de geotextil y material drenante; y, colocación de concreto en la zona bajo el muro de contención de la relavera.* Tomado de la sección: 7.2.4.1.3

De manera adicional se afirma que se contempla un sistema de drenaje del agua en contacto con la mina subterránea, la cual se lleva a superficie para su uso dentro del proceso de explotación y su posterior tratamiento, afirmándose que:

> *(…) para el caso de la mina del PMLL, el sistema de drenaje se ha diseñado considerando una mina relativamente seca con un bajo requerimiento de desagüe, en vista de que esta se encuentra a gran altura en una cadena montañosa, lo que limita el potencial de las fuentes de entrada de agua.*

Sin duda, estos cálculos de "*bajo requerimientos de desagüe*" (poca agua por achicar o extraer de las galerías y túneles de la mina) vienen del modelo numérico de las aguas subterráneas, con todas las limitaciones y errores que tiene dicho modelo y que ya se han considerado anteriormente en este informe, por lo que es muy probable su subestimación al considerar conductividades hidráulicas demasiado bajas.

Esto genera incertidumbres respecto a la capacidad del sistema para efectivamente drenar todas las aguas de la excavación y también de la capacidad de la planta de tratamiento o las piscinas de manejo de aguas para almacenar y tratar un volumen que puede ser potencialmente mayor. También es necesario indicar que estas aguas que potencialmente se van a bombear a superficie entrarán en contacto con sulfuros en un ambiente que puede tener mayor cantidad de oxígeno debido a los abatimientos generados, favoreciendo los procesos de oxidación y liberación de arsénico y metales pesados. Adicionalmente, no irá directamente a la planta de tratamiento, sino que se utilizará en actividades propias de la explotación como la supresión de polvo de mina o en la planta de procesamiento de mineral, donde podrá contaminar suelos, aire o aguas superficiales y subsuperficiales.

También llama la atención que a pesar de los grandes volúmenes de agua subterránea que serán bombeados y utilizados en el proceso de explotación, esto no se considere en el EsIA como una captación que tiene impactos sobre la oferta hídrica y de la cual la empresa minera se sirve para desarrollar su proyecto. A continuación, se ilustran estos valores que se encuentran en el orden de 40 m^3/hora o 10 l/s, como se ilustró también en figuras anteriores, relacionadas con los resultados del modelo numérico:



Tabla 7-32 Balance de Agua para el Área de la Mina y Áreas Adyacentes del PMLL

Año	Desagüe de las Aguas de Infiltración (m³/h)	Escorrentía del Área de la Mina (m³/h)	Total hacia la Piscina de Aguas Contactadas (mina) (m³/h)	Relleno de Pasta (m³/h)-Sumidero de Agua	Retorno del Agua de Relleno (m³/h)	Bombeado al Tanque de Agua Principal (m³/h)
Año -2	10,8	7	17,8	-11		-17,8
Año -1	25,2	7	32,2	-11		-32,2
Año 1	43,2	7	50,2	-11	-1,4	-51,6
Año 2	50,4	7	57,4	-11	-1,4	-58,8
Año 3	43,2	7	50,2	-11	-1,4	-51,6
Año 4	39,6	7	46,6	-11	-1,4	-48
Año 5	39,6	7	46,6	-12,4	-1,6	-48,2
Año 6	43,2	7	50,2	-12,4	-1,6	-51,8
Año 7	39,6	7	46,6	-12,4	-1,6	-48,2
Año 8	36	7	43	-12,4	-1,6	-44,6
Año 9	36	7	43	-12,4	-1,6	-44,6
Año 10	36	7	43	-12,4	-1,6	-44,6
Año 11	43,2	7	50,2	-12,4	-1,6	-51,8
Año 12	36	7	43	-12,4	-1,6	-44,6

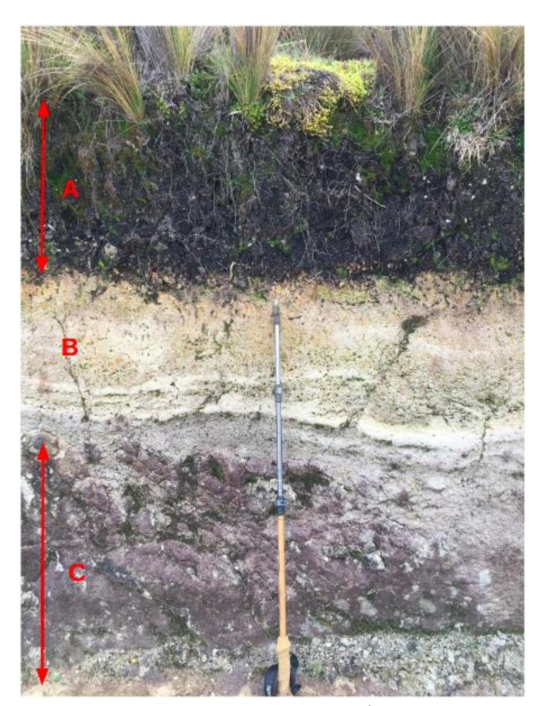
TABLA 9. VALORES DE EXFILTRACIÓN PREDICHOS POR EL MODELO NUMÉRICO Y UTILIZADOS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE DESAGÜE. FUENTE: MODIFICADA DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)[129]

En relación con los relaves que se enterrarán a profundidad en un relleno en forma de pasta, en el EsIA se afirma que no hay posibilidad de que se conviertan en fuentes de contaminación debido a que las posibles reacciones de oxidación no son viables en profundidad. Sin embargo, pasan por alto otro tipo de mecanismos por los cuales se puede movilizar arsénico en el agua, que incluyen su liberación en condiciones reductoras.

Es evidente además la imposibilidad de que bajo la actual configuración de piezómetros o puntos de agua subterránea pueda existir un monitoreo efectivo de la calidad del agua por razones muy claras. La profundidad de los piezómetros respecto a la superficie del terreno alcanza solo un máximo de 88 metros, mientras que la excavación subterránea está a una profundidad de 150 metros. Ya que no hay mecanismos de flujo en sentido vertical y hacia la superficie, aun cuando estos relaves enterrados se constituyan en fuentes de contaminación, es extremadamente difícil que los piezómetros permitan un correcto monitoreo.

Por último, si bien se plantea la remoción del suelo sobre el que se construirá la relavera, es importante tener en cuenta el perfil de suelo sobre el que se construirá esta estructura. En campo se pudo evidenciar un perfil típico del suelo que se muestra en la siguiente figura:

[129] INV Metals - Cardno Entrix (2021). Estudio de impacto ambiental y Plan de manejo ambiental del proyecto minero Loma Larga bajo régimen de gran minería para las fases de explotación y beneficio.



FOTOGRAFÍA 5. PERFIL DE SUELO EN LA ZONA DONDE SE DISPONDRÁ LA RELAVERA. FUENTE: FOTOGRAFÍA PROPIA.

En cada uno de estos horizontes existe un comportamiento hidráulico diferenciado, en la capa A se tienen la mayoría de las mediciones adelantadas.

Para la capa A, por ejemplo, en el trabajo de grado de la Universidad de Cuenca se indica con respecto a la capacidad de infiltración de estos materiales, las siguientes conductividades hidráulicas, de 10 (2,7 x 10^{-6} m/s) a 60 mm/h (1,66 x 10^{-5} m/s) y de 11 mm/h (3,05 x 10^{-6} m/s), basados en las investigaciones desarrolladas por Buytaert, Celleri y Feyen (Pesantez Parra, 2017)[130]. Estos trabajos realizan estimaciones de otro parámetro relevante en la regulación hídrica, que es la curva de retención hidráulica, en la cual se muestra cómo si bien se tiene una capacidad moderada de conducir agua, el subsuelo presenta una alta capacidad de retener agua, que en parte es la razón por la que en sitios como el páramo de Quimsacocha se tengan extensas zonas saturadas.

Se han adelantado mediciones parciales de la conductividad hidráulica por INV Metals las que indican que la conductividad hidráulica es del orden de 10^{-6} m/s. Dichas mediciones se desarrollaron aplicando el "*auger hole method*", cuyos valores se sintetizan en la siguiente tabla.

Tipo de suelo	Conductividad Ksat -	
	(cm/h)	(m/s)
Histosol	1,7 a 4,72 x 10^{-6}	0,99 a 2,75 x 10^{-6}
Andosol	0,84 a 2,33 x 10^{-6}	1,17 a 3,25 x 10^{-6}
Cambisol	0,34 a 9,44 x 10^{-7}	0,16 a 4,44 x 10^{-6}

TABLA 10. VALORES PROMEDIO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA PARA LA PROFUNDIDAD DOMINANTE DE LAS RAÍCES POR TIPO DE SUELO EN EL ÁREA DE ESTUDIO BASADO EN LOS 18 PERFILES DE SUELOS. TOMADO DE TABLA 6-69.

130 Pesantez-Parra (2017). Identificación del impacto producido por la minería en Quimsacocha en la recarga de aguas superficiales y subterráneas a través de un estudio hidrogeológico. Tesis de grado. Universidad de Cuenca.



Adicionalmente, durante la presente evaluación se han desarrollado pruebas de infiltración en campo por parte de Terrae las cuales indican valores del orden de 10^{-7} m/s hasta 10^{-8} m/s. Las pruebas desarrolladas en campo se basaron en el método de Porchet[131]. Gráficamente el comportamiento se puede ver en la siguiente figura en donde se ilustra la infiltración acumulada (en el anexo 1 se presentan los resultados de las pruebas de infiltración adelantadas en campo por Terrae en junio de 2022).

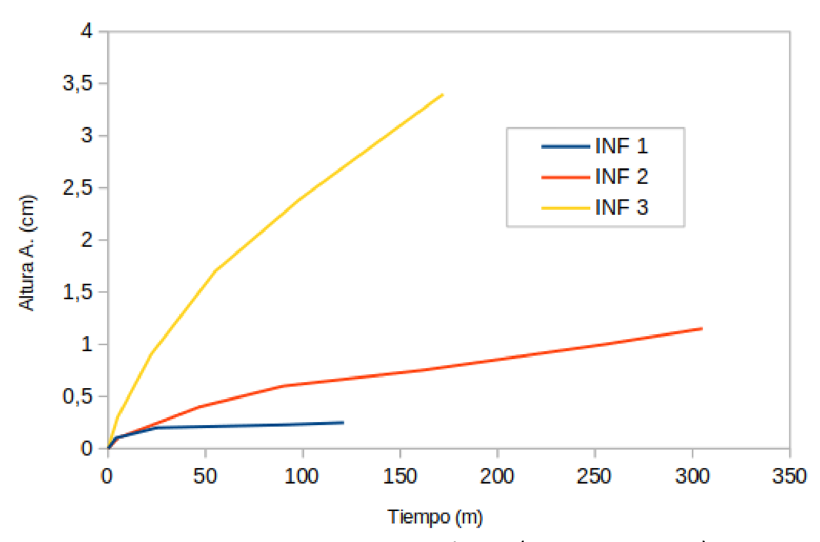


FIGURA 61. EJEMPLO DE UN PROCEDIMIENTO DE RASTREO DE PARTÍCULAS (*PARTICLE TRACKING*) UTILIZADO PARA ESTABLECER POSIBLES TRAYECTORIAS DE UN CONTAMINANTE EN EL AGUA SUBTERRÁNEA PROVENIENTE DE DOS FUENTES DIFERENCIADAS HACIA UN ARROYO. FUENTE: TOMADA DE WELS ET AL. (2012)[132]

En la figura anterior las curvas asociadas a las pruebas INF 1 (Conductividad promedio[133] de 0,4 x 10^{-8} m/s) e INF 2 (0,1 x 10^{-8} m/s) fueron realizadas a menos de 2 metros de distancia, en una zona inundable. La tercera prueba fue realizada en una zona seca (1 x 10^{-7} m/s). El orden de magnitud de diferencia se dio principalmente entre los suelos ubicados en las zonas inundadas (menor conductividad hidráulica) y en la zona ubicada justo bajo el área en donde se ubicaría la relavera.

Con base en estos resultados los valores de la conductividad hidráulica indican el comportamiento diferencial que tiene el suelo a medida que cambia la saturación, es decir, si bien es cierto que la conductividad hidráulica del suelo es elevada cuando el suelo se encuentra en condiciones no

[131] Este método consiste en abrir un agujero en el suelo de aproximadamente 20 cm de diámetro y una profundidad de 20 cm, y permitir de un volumen de agua se infiltra

[132] Wels, C., Mackie, D., & Scibek, J. (2012). Guidelines for groundwater modelling to assess impacts of proposed natural resource development activities. Ministry of Environment, Water Protection & Sustainability Branch.

[133] El promedio obtenido ha sido obtenido de con un número limitado de datos, por lo que el valor promedio debe considerar se únicamente como referencia de donde se encuentran los valores de la conductividad hidráulica.



saturadas, dicha conductividad disminuye a medida que la saturación del suelo aumenta. En este sentido se tienen entonces dos posibilidades:

1. En el caso de que las medidas de mitigación sean insuficientes, el flujo de agua de las relaveras se puede infiltrar y en el suelo será retenida la fracción de agua que se infiltre.
2. El suelo al estar saturado difícilmente permite que el agua se infiltre por lo que el agua se tiene un potencial de convertirse en agua superficial, la cual deberá ser dirigida a la piscina de manejo de aguas.

Con respecto a las demás capas se puede indicar:

Para la capa B, en esta capa de roca meteorizada ubicada bajo la unidad de suelo del páramo y con alta probabilidad de permitir el flujo de agua, se encontró una alta porosidad y permeabilidad evaluadas de forma práctica y cualitativa en campo. Sin embargo, es notoria la ausencia de información con respecto a esta capa en los informes de INV Metals.

En la capa C, correspondiente al macizo rocoso, se tiene una gran proporción de fracturas abiertas inclinadas vertical a subverticalmente, pero la conductividad asociada a ellas ha sido subestimada. Es obvio que por la inclinación de las fracturas las diferentes unidades de roca tienen una alta probabilidad de flujo en la dirección vertical.

Estos dos aspectos finales indican que de darse un flujo de agua hasta la base de la capa C, se puede tener una alta posibilidad de migración hacia las aguas profundas, sin embargo, dada la inexistencia de pruebas de caracterización hidráulica idóneas no se puede cuantificar o tener certeza de que los flujos se queden restringidos en la capa A.

2.8 Resumen de las contradicciones en la hipótesis de la desconexión del páramo y las aguas subterráneas

Una vez se realizó la evaluación del EsIA fue evidente la importancia de la conexión del sistema de páramo con las aguas subterráneas como un eje temático alrededor del cual se presentan la mayoría de las incertidumbres relacionadas con los potenciales impactos del proyecto minero Loma Larga.

A manera de resumen, en el componente de hidrología se descartó cualquier aporte significativo de las aguas subterráneas al flujo de las aguas superficiales, e igualmente se afirmó que la recarga proveniente del páramo hacia las aguas subterráneas puede considerarse despreciable. En relación con este último postulado, a partir de los análisis desarrollados en este informe, se identificó que las características químicas del agua no soportan tal desconexión y por el contrario sugieren que el páramo sí puede constituirse en una fuente de recarga para las aguas más profundas. Adicionalmente, la empresa minera pasó por alto otros aspectos de la caracterización geológica básica, como la presencia de fracturas verticales y subverticales que pueden favorecer la conexión del páramo con las aguas subterráneas profundas. Finalmente, es una clara omisión el no haber desarrollado estudios de isotopía que permitieran contar con argumentos más claros para la definición de áreas de recarga y la identificación de tiempos de tránsito del agua por el subsuelo.



Más adelante, el EsIA se apoya en el modelo numérico para afirmar que la recarga al sistema de aguas subterráneas profundas es tan solo del 1 %. Como se demostró en este informe, esta cifra es falaz y se deriva de los graves errores conceptuales identificados en la elaboración del modelo. Adicionalmente, dicho modelo también entra en una clara contradicción con los postulados expuestos en hidrología, al predecir que el cono de abatimiento generado por la excavación afectaría el caudal de la quebrada Quinuahuaycu (río Irquis), lo cual sería imposible si en realidad las aguas superficiales están desconectadas del sistema de aguas subterráneas.

Además de que el EsIA admite la posibilidad de la conexión entre el sistema de páramo y las aguas subterráneas, en esta evaluación se logró identificar que, debido a la pobre caracterización de las propiedades hidráulicas de los materiales geológicos, tanto la extensión del cono de abatimiento como las posibles afectaciones en términos de oferta hídrica pueden estar subestimados. A esto se suma la ausencia total de planteamientos o modelos que permitan abordar el transporte de contaminantes potenciales derivados de la explotación.

Esta concatenación de errores, omisiones e hipótesis carentes de sustento técnico ponen en duda el modelo hidrogeológico conceptual presentado por la empresa minera y plantean un escenario de incertidumbre frente a los verdaderos impactos que se pueden derivar de la explotación.

Las decisiones tomadas por la autoridad ambiental colombiana en el marco del proceso de licenciamiento de dos proyectos de minería de oro (uno de ellos ubicado en el páramo de Santurbán) pueden servir de referencia, dadas las grandes similitudes con el caso del proyecto Loma Larga.

En el año 2020, mediante Auto No 09674 la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) archivó el trámite de solicitud de licencia ambiental del proyecto minero Soto Norte (ubicado en Santander, páramo de Santurbán), debido a las inconsistencias identificadas en la definición del área de influencia, los aspectos técnicos del depósito de relaves (residuos de la actividad minera), las consideraciones sobre la geotecnia, la hidrología e hidrogeología, el plan de manejo de riesgos y la valoración económica.

Si bien se identificaron inconsistencias en todos los componentes anteriormente mencionados, destacan aquellas identificadas en el componente de hidrogeología, debido a las grandes similitudes que se presentan con el proyecto minero Loma Larga:

> *El área de influencia del EIA para solicitud de Licencia Ambiental del "Proyecto de Explotación Subterránea de Minerales Auroargentíferos Soto Norte", presentado por la Sociedad mediante 2020003948-1-000 del 13/01/2020 (VITAL 3500090006326220002), presenta incertidumbre debido a que al realizar la interpretación y evaluación del componente isotópico, se manifiesta la falta de conectividad entre los sistemas de aguas subterráneas del páramo y la zona de mina; en el modelo hidrogeológico numérico, se afirma que la inyección de lechada va a limitar la propagación del abatimiento hacia el páramo y además se indica que se presenta un flujo intermedio con recarga desde la zona de páramo con mayores altitudes y descarga en inmediaciones del valle de la quebrada la Baja en el capítulo de caracterización del medio abiótico; las anteriores contradicciones generan*



incertidumbre frente al real alcance del impacto en el componente hidrogeológico del capítulo de evaluación ambiental y por ende de la real delimitación del área de influencia.

Como se puede apreciar, en el EsIA elaborado por la empresa MINESA en el páramo de Santurbán (Santander, Colombia) también se presentaron las mismas contradicciones respecto a la relación del páramo y las aguas subterráneas. En este caso, a partir del análisis isotópico se llegó a una conclusión, mientras que los resultados del modelo numérico sugirieron otra cosa. Es importante reiterar que en los estudios del proyecto Loma Larga NO se muestran análisis isotópicos.

De manera similar, en el año 2021 mediante Auto No 09023 la ANLA archivó el trámite de solicitud de licencia ambiental del proyecto minero Quebradona (ubicado en Antioquia) debido a las inconsistencias técnicas halladas en la definición del área de influencia, la caracterización de los componentes hidrogeológico, hidrológico, de geotecnia y biótico, consideraciones frente al depósito de relaves (residuos de la actividad minera) y a la subsidencia, entre otros. En este caso, las contradicciones saltan a la vista, encontrándose grandes similitudes con el proyecto Loma Larga.

En el siguiente extracto es evidente como los autores de dicho estudio plantean sin ninguna evidencia clara la existencia de un "medio impermeable" que separa dos sistemas de flujo, limitando los posibles impactos de la explotación aguas abajo:

Para el caso específico de la zona de estudio, las líneas de flujo locales poseen un comportamiento bifurcado, comprendido por dos sistemas diferentes uno que abarca desde la parte alta de la cuenca Quebradona hacía su desembocadura en el río Piedras, con dirección preferencial de flujo NW, y el otro va desde el escarpe estructural al río Cauca, con dirección preferencial NE. Ambos sistemas se separan por un límite con características hidráulicas desconocidas, sin embargo por la naturaleza de la roca se asume como un posible medio impermeable.

En este punto la existencia de límites impermeables que limitan los impactos de la minería ya empieza a parecer una circunstancia muy afortunada y común en los grandes proyectos de explotación, incluyendo la supuesta desconexión del páramo y las aguas subterráneas profundas planteada para el caso de Loma Larga (sin mayor soporte). Pero una vez más, las contradicciones saltan a la vista cuando se consideran argumentos como el de la hidrogeoquímica. Para el caso de Quebradona el límite impermeable implicaba que los flujos de agua se daban solo a nivel local (sin grandes tiempos de tránsito del agua subterránea por las rocas); sin embargo, la hidrogeoquímica reveló que:

En la cuenca Quebradona existe un segundo tipo de aguas, las cuales corresponden a aguas de mayor profundidad y que se caracterizan por un flujo más lento. Estás aguas se caracterizan por presentar concentraciones importantes de sulfatos y cloruros, característica que no se encuentra en las aguas que tienen relación directa con el agua lluvia, este tipo de agua corresponden a piezómetros y al pozo saltante.

De acuerdo con lo establecido por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales de Colombia - ANLA *"(...) es evidente que se presenta flujo local, intermedio y regional, bajo diferentes hipótesis relacionadas con las condiciones hidrológicas y su temporalidad (...)"*



Teniendo en cuenta lo anterior, de manera correcta la autoridad ambiental (ANLA) consideró que para ambos casos las contradicciones no permiten llegar a establecer el verdadero alcance de los impactos de la explotación, y en respuesta a estas incertidumbres y a otras inconsistencias decidió desestimar y archivar las solicitudes de licencia ambiental.

Considerando estos claros antecedentes y todas las falencias identificadas en el EsIA a lo largo de esta evaluación, es evidente la inviabilidad de llevar a cabo el proyecto minero Loma Larga, por las incertidumbres que plantea respecto a los potenciales impactos ambientales y humanos, y por el riesgo que supone para las comunidades de la provincia de Azuay.



3. COMPONENTE DE CALIDAD DE AGUAS

El proyecto minero Loma Larga, que se encuentra en el páramo y Área de Recreación de Quimsacocha entre los cantones de Cuenca y Girón, pretende intervenir alrededor de 85 ha en superficie y hasta 120 m de profundidad con actividades asociadas a la minería de metálicos, específicamente cobre y oro.

Al encontrarse en la parte alta de la caldera colapsada de Quimsacocha, el patrón de drenaje en el área del proyecto es de tipo radial. Dentro de esta se encuentra el nacimiento de los ríos Shucay que corre hacia el NE, y del río Portete y río Tarqui, que corren hacia el SE. Además, de acuerdo con la base topográfica de ESRI[134], el proyecto se encuentra aguas arriba del nacimiento de las quebradas Tutupalhuaycu, quebrada Habaspamba, río San Agustín (que drenan hacia el E), quebrada El Chorro, quebrada Sombrereros, quebrada Alumbre (que drenan hacia el sur) y río Bermejos (que drena hacia el N).

En cuanto a geología, según la Hoja Geológica No. 54[135] del cantón Girón, el área titulada para el desarrollo del proyecto Loma Larga se encuentra principalmente sobre lavas andesíticas con fenocristales de plagioclasa del Mioceno Superior pertenecientes a la Formación Quimsacocha. Esta a su vez se encuentra sobre brechas tobáceas, conglomerados andesíticos y areniscas y limolitas tobáceas de la Formación Turi, también del Mioceno Superior.

El depósito mineralizado de Loma Larga se encuentra emplazado en la Formación Quimsacocha y corresponde a un depósito epitermal de alta sulfuración. De acuerdo con Camprubi *et al.* (2003)[136] estos depósitos se caracterizan por una mineralización típicamente diseminada, es decir que es poco común encontrarla como relleno de cavidades (fracturas) o poros. En cuanto a su composición, menciona que los minerales de sulfuros (compuestos de azufre en estado de oxidación $^{-2}$ y metales) pueden encontrarse de 10 al 90 % del volumen total de la mineralización, particularmente en grano fino. Los minerales de sulfuro más comunes en estos depósitos son pirita (sulfuro de hierro), enargita-luzonita (sulfuros de cobre y arsénico), calcopirita, bornita (sulfuros de hierro y cobre), calcosita, covelitta (sulfuros de cobre), tetraedrita-tenantita (sulfuro de hierro, cobre, arsénico y antimonio), esfalerita (sulfuro de zinc) y galena (sulfuro de plomo). Y como minerales menos comunes u ocasionales están la arsenopirita (sulfuro de hierro y arsénico), bismutinita (sulfuro de bismutos) y seleniuros.

La presencia de minerales de sulfuro y su distribución dentro de estos yacimientos metálicos implican un alto riesgo de contaminación de aguas superficiales y subterráneas y suelos por los procesos de acidificación que implican su exposición al oxígeno. El volumen de estos minerales de sulfuro es muchísimo mayor que la de los minerales que son objetivo de extracción, y se encuentran distribuidos dentro del yacimiento de tal manera que no es posible extraer la mena sin exponer

---

[134] De acuerdo con el BaseMap *World Topographic Map* disponible en ArcGIS Pro

[135] Ministerio de Energía y Minas (2005). Mapa Geológico de Girón – Escala 1:100.000. Supervisión Geológica. Unidades de Cartografía y Recursos Minerales.

[136] Camprubí, A; González-Partida, E; Levresse, G; Tritlla, J & Carrilo-Chávez, A (2003) Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Tomo LVI, No. 1, 2003, págs. 10-18.



también los demás sulfuros. Tanto así que Camprubi *et al.* (2003) mencionan entre los metales predominantes en estas mineralizaciones el arsénico y el plomo, y como metales presentes localmente el bismuto, antimonio, molibdeno, selenio, zinc, telurio y mercurio.

Este capítulo aborda los impactos a la calidad del agua superficial y subterránea, y eventualmente a los suelos, que podría generar la ejecución de un proyecto de minería de metálicos como lo es Loma Larga en un ecosistema de gran importancia ambiental pero igualmente susceptible como lo es el páramo. De acuerdo con Chuncho & Chuncho (2019)[137], los principales servicios ecosistémicos que brindan los páramos del Ecuador son el almacenamiento y regulación de agua de alta calidad y su papel como sumideros de carbono. Estas funciones están estrechamente relacionadas con las características físicas de los suelos que allí se encuentran (porosidad y densidad), por lo que su intervención implicaría inevitablemente una modificación al ciclo del agua, tanto en el suministro como en la calidad de esta.

Dicho abordaje se hará de acuerdo con la información del EsIA (INV Metals – Cardno Entrix, 2021) presentado por la empresa y reforzado con información de referencia del área de estudio y de yacimientos y minas similares al que se plantea en el proyecto de Loma Larga. También se utilizarán datos y observaciones levantadas por los profesionales de TERRAE en el levantamiento geoambiental rápido realizado en junio de 2022 en el páramo de Quimsacocha y alrededores.

3.1 Marco teórico y de referencia

La principal amenaza sobre la calidad de agua superficial y subterránea durante y después de la ejecución de un proyecto minero de metálicos es la generación del drenaje ácido de mina (DAM). Este fenómeno se da por la alteración de las aguas provenientes de zonas mineras debido a una serie de reacciones geoquímicas y microbiológicas que involucran agua, roca y aire, debido a la exposición de grandes volúmenes de desechos rocosos a condiciones atmosféricas que resultan en la acidificación del agua (Fierro, 2012[138]).

Como consecuencia de esta alteración, se evidencia un aumento en la concentración de sulfatos, hierro, manganeso, aluminio y metales pesados (mercurio, plomo, cadmio, cobre, arsénico, níquel y cromo) en el agua. Todo ello disminuye la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos, es tóxico para invertebrados, anfibios y peces, contamina el suelo y las plantas del área y es nocivo para la salud humana (Zhao et al., 2011[139], Nordstrom, 2011[140]).

---

[137] Chuncho, C & Chuncho, G (2019) Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. Bosques Latitud Cero Vol. 9 (2). Págs. 71-83

[138] Fierro, J. (2012). Una aproximación sintética sobre impactos ambientales de la minería no legal. En Garay, L.J et al. Minería en Colombia. Institucionalidad y territorio, paradojas y conflictos, Vol 2. Contraloría General de la República. Bogotá.

[139] Zhao, Huarong; Beicheng, XIa; Jianqiao, Qin; Zhang, Jiaying. (2011). Hydrogeochemical and mineralogical characteristics related to heavy metal attenuation in a stream polluted by acid mine drainage: A case study in Dabaoshan Mine, China. Journal of Environmental Sciences, págs. 979 – 989.

[140] Nordstrom D.K. (2011) Sulfide Mineral Oxidation. In: Reitner J., Thiel V. (eds) Encyclopedia of Geobiology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht



Las consecuencias en la contaminación del agua en este tipo de proyectos son inmediatas dado que las transformaciones químicas en las rocas extraídas inician al exponer las rocas al aire. En efecto, el proceso de meteorización de rocas con pirita diseminada se acelera sustancialmente en proyectos mineros, acidifica aguas y causa la liberación de sustancias perjudiciales al ambiente (sulfatos, arsénico, metales pesados, etc.) la cual se acelera en una tasa proporcional al proceso de alteración (Cuida, 2014)[141].

3.1.1 Oxidación de sulfuros

Para el desarrollo de actividades mineras es necesario exponer grandes volúmenes de roca que se encontraban en el subsuelo completamente aisladas del oxígeno, al aire y agua de manera abrupta e inmediata (años a decenas de años). En el caso de la minería de metálicos, tal y como se mencionó previamente, estos yacimientos se caracterizan por tener altas concentraciones de sulfuros, los cuales fueron formados, y por lo tanto son estables, bajo ambientes reductores (sin exposición al oxígeno).

El más abundante de los minerales de sulfuro es la pirita y otros comunes son la calcopirita, la molibdenita, la esfalerita, la galena y la arsenopirita. La oxidación de algunos de estos sulfuros, particularmente el primero, genera ácido sulfúrico (H_2SO_4) responsable del pH ácido característico del drenaje ácido de mina (Gaviria *et. al*., 2013[142]). La primera reacción que se da es la oxidación de los sulfuros (MeS) a sulfatos (SO_4), donde el azufre pasa de valencia *-2* o *0* a *+6* y se liberan iones H^+ acidificando el medio:

$$1)\ 2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \text{ ▯ } Fe^{2+} + 4SO_4 + 4H^+$$

Luego, el hierro ferroso (valencia $^{+2}$) se oxida a hierro férrico (valencia $^{+3}$) formando hidrolizado de Fe^{+3} y acidificando aún más el medio nuevamente por liberación de H^+:

$$2)\ 2Fe^{2+} + {}^{1}/_{2}O_2 + 5H_2O \text{ ▯ } 2Fe^{3+}(OH)_3 + 4H^+$$

Estas reacciones son inevitables teniendo en cuenta que siempre que la pirita se exponga al aire y al agua, se oxidará y generará acidez, dado que la termodinámica de esta reacción química es altamente espontánea y exotérmica en condiciones ambientales. Si bien la oxidación de la pirita es la principal razón de acidificación del medio (al ser la más abundante), es importante tener en cuenta que otros sulfuros también se oxidan y durante el proceso también generan acidez y liberan metales que pueden tener implicaciones ambientales.

Por ejemplo, sulfuros como marcasita (FeS_2), pirrotina ($Fe_{1-x}S$) y arsenopirita (FeAsS) también acidifican el medio al oxidarse bajo condiciones de intemperismo (Railsback, 2012[143]; Ospina Correa

---

[141] Cuida López, E. (2014). Caracterización mineralógica y geoquímica de lodolitas oscuras de las formaciones Une y Chipaque en la cuenca del Río Chuza, Páramo de Chingaza. Trabajo de grado Geología. Universidad Nacional de Colombia.
[142] Gaviria, S., Sánchez, M., & Tangarife, A. (2013). Caracterización litológica e hidrogeoquímica en la Cuenca del río Chuza, Páramo de Chingaza. En E. d. Bogotá, Páramos colombianos frente al Cambio Climático: calidad y sostenibilidad de suelos y agua potable para Bogotá. Bogotá.
[143] Railsback, B. (2012). Some Fundamentals of Mineralogy and Geochemistry. Department of Geology, University of Georgia, Athens, Georgia 30602-2501 U.S.A

et al., 2011[144]). Incluso, de acuerdo con Ospina *et* al. (2011), la arsenopirita se oxida más rápido que la pirita dado que el enlace As – S es más débil que el de Fe – S. En general, puede esperarse que los sulfuros con relación 1:2 (MeS_2) deban involucrar moléculas de agua en el proceso de oxidación lo cual eventualmente liberará iones H+ al medio.

En cuanto a la enargita (Cu_3AsS_4), Lattanzi *et al.,* (2008)[145] afirman que el drenaje generado por depósitos y rocas con este mineral es ácido, si bien por estar siempre acompañado de pirita, pero además por su propio proceso de oxidación. Al exponer la enargita a la intemperie (oxígeno y agua) se genera una reacción similar a la de la pirita, excepto la liberación en esta de arsenatos (AsO_4) y cobre en solución. El escenario es aún más preocupante en presencia de hierro férrico (Fe^{3+}), propio de ambientes oxidantes como zonas mineras (Figura 62), donde la oxidación genera ácido arsénico ($HAsSO_4$) y ocho veces más iones hidronio (acidez) que la reacción normal:

$$3)\ Cu_3AsS_4 + 35Fe^{3+} + 20H_2O \rightarrow 3Cu^{2+} + 35Fe^{2+} + HAsO_2^{4-} + 4SO_2^{4-} + 39H^+$$

De acuerdo con lo anterior, si bien el oxígeno que se encuentra en el aire (O_2) oxida la pirita en la primera reacción (1), el hierro férrico es el principal agente oxidante para ésta y para los demás sulfuros, siendo esta reacción mucho más rápida y generando más acidez que la que involucra el dioxígeno (Rimstidt *et al.,* 1993[146]; Nordstrom, 2011).

---

144 Ospina Correa, J.; Osorno Bedoya, L.; Giraldo Builes, J.; Mejía Restrepo, E.; & Marquez Godoy, M. (2011). Aplicaciones biotecnológicas en minería aurífera: Estado del arte sobre la oxidación bacteriana de arsenopirita (FeAsS). Informador Técnico (Colombia) Edición 75, Enero - Diciembre 2011, pág. 53 - 65

145 Lattanzi, P; Da Pelo, S; Musu, E; Atzei, D; Elsener, B; Fantauzzi, M & Rossi, A (2008). Enargite oxidation: A review. Earth-Science Reviews 86. Págs 62–88

146 Rimstidt J, Chermak J, & Gagen P. (1993). Rates of Reaction of Galena, Sphalerite, Chalcopyrite, and Arsenopyrite with Fe(III) in Acidic Solutions. En Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation.

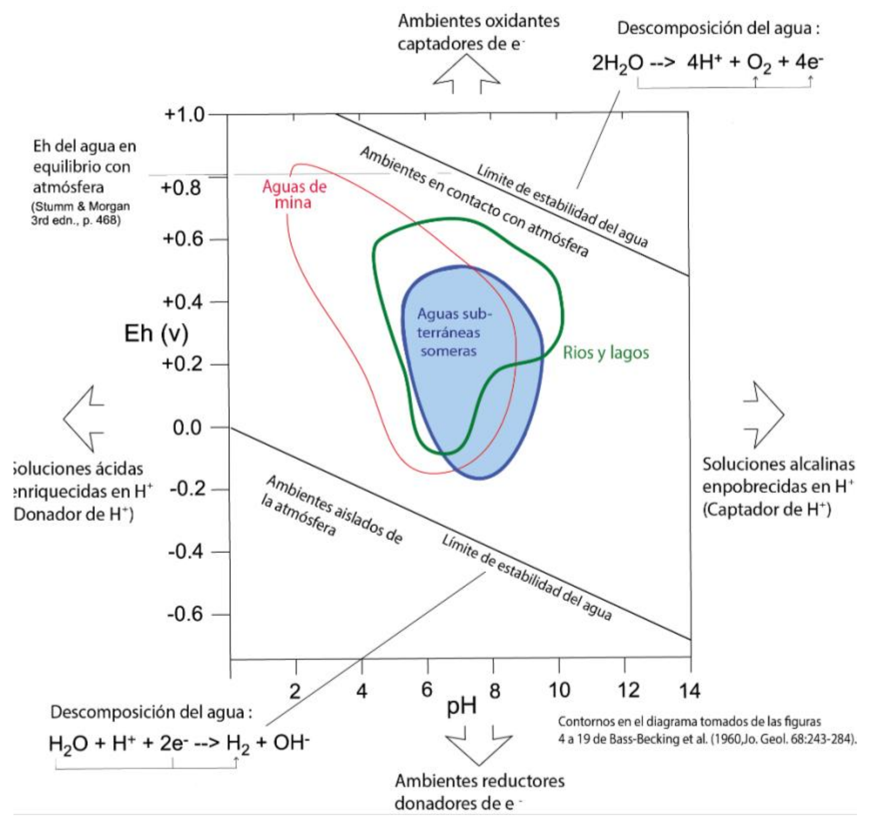


Figura 62. DIAGRAMA EH - pH PARA AGUAS NATURALES Y AGUAS DE MINA

FUENTE: RAILSBACK, 2012.

El hierro férrico (Fe^{3+}) se encuentra disponible en el sistema a partir de la oxidación del hierro ferroso (Fe^{+2}) que se libera por la oxidación inicial de la pirita (reacción 2). La oxidación del hierro se da rápidamente a pH circumneutrales por la acción del oxígeno disuelto en el agua, mientras que a pH ácidos es más lento, pero puede verse acelerado por la actividad metabólica de bacterias como la *Thiobacillus ferrooxidans* que usan el O_2 para este proceso (Rimstidt *et al.,* 1993).

Con respecto a los valores de pH en aguas de zonas mineras (Figura 62), debe tenerse en cuenta que en pH ácidos la disolución de silicatos, óxidos y carbonatos de hierro que aporta Fe^{+2} al sistema, acelerando e intensificando aún más la oxidación de los sulfuros metálicos y compuestos de azufre. Por ejemplo, Ospina Correa *et al* (2011) establecen que la oxidación del hierro y el arsénico bajo un pH de 6,3 a 6,7 es 4 órdenes de magnitud más lenta que bajo un pH entre 2 y 4,5.

Si bien casi todos los sulfuros se oxidan lentamente en condiciones normales de intemperismo, bajo un amplio rango de pH y sin un agente oxidante presente, existen algunos otros factores que favorecen la oxidación de los estos en zonas mineras.

Por ejemplo, el aumento de temperatura por el carácter exotérmico de la reacción de oxidación de la pirita favorece la disolución de otros sulfuros como la calcopirita, situación que aumenta su disolución a altas temperaturas (60 - 70°C) al darse las condiciones para el desarrollo de bacterias



termófilas las cuales pueden disolver la calcopirita (Menadier Stavelot, 2009[147]). Según Ibáñez y Velásquez (2013[148]) la pirita no solo favorece la reacción de oxidación de la calcopirita, sino que funciona como catalizador, es decir que en presencia de ésta la velocidad de la reacción aumenta. Así mismo, en algunos casos la presencia de otros sulfuros acompañando a la pirita generan mayor acidez que la reacción de la misma cantidad de pirita (Lattanzi *et al.,* 2008).

En cuanto a la disponibilidad de oxígeno o potencial Redox, si bien los procesos de oxidación de la pirita y demás sulfuros se dan fácilmente en ambientes aeróbicos, es decir con oxígeno molecular (O_2) disponible, estos también pueden darse en ambientes anaeróbicos, es decir donde el oxígeno molecular es bajo o incluso ausente. De acuerdo con Heidel y Tichomirowa (2010[149]) en ambientes anaeróbicos la oxidación de la pirita se da principalmente por acción del Fe^{+3} cuando este se encuentra en altas proporciones dentro de la solución. Sin embargo, si la concentración de Fe^{+3} es baja, la oxidación se da por oxígeno molecular que fue adherido a las superficies de la pirita debido a cortos periodos de exposición al aire previo a disponerla en condiciones anaeróbicas.

Finalmente, el tamaño de las partículas puede afectar fuertemente la oxidación de los sulfuros y su tasa de disolución. A mayor área superficial de partícula, mayor será la superficie de reacción (Figura 63). Según Nordstrom (2011) partículas finas de pirita reaccionan más rápido que partículas gruesas de esfalerita, mientras que si ambas tienen el mismo tamaño será la esfalerita la que disuelva más rápidamente.

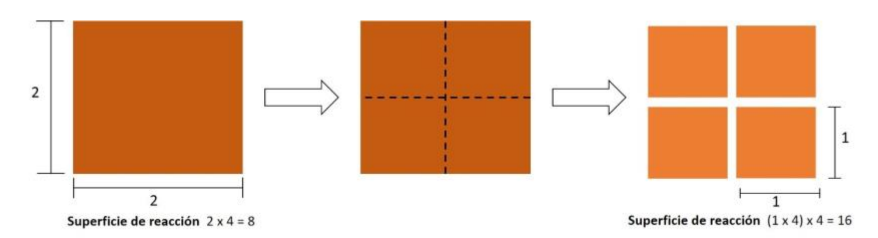


Figura 63. AUMENTO DE SUPERFICIE REAL DE REACCIÓN AL DISMINUIR TAMAÑO DE PARTÍCULA

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

3.1.2 Liberación de especies químicas

Como se mencionó en la sección anterior, el Fe^{+3} disponible en el agua reacciona y oxida otros sulfuros disponibles en el medio bajo ciertas condiciones de pH. Adicional a la acidez que aportan estas reacciones, los metales pesados que componen los sulfuros (como plomo, zinc, arsénico y cobre, entre otros) se liberan y quedan en solución.

---

[147] Menadier, M (2009). Biolixiviacion de piritas por *Acidithiobacillus ferrooxidans* y cepas nativas. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil en Biotecnología. Universidad de Chile

[148] Ibañez, T. & Velásquez, L. (2013). Lixiviación de calcopirita en medios clorurados. Revista de Metalurgia. Centro Internacional de Investigaciones Metalúrgicas.

[149] Heidel C & Tichomirowa, M. (2011). The isotopic composition of sulfate from anaerobic and low oxygen pyrite oxidation experiments with ferric iron — New insights into oxidation mechanisms. Chemical Geology Vol. 281. Pág 305-316

Los diagramas de Eh (Redox) – pH (potencial de hidrógeno), más conocidos como diagramas de Pourbaix, muestran la estabilidad de compuestos metálicos, como los sulfuros, y permiten prever la respuesta de estos a cambios de condiciones ambientales. Adicionalmente, permiten interpretar la solubilidad de los metales pesados y otros elementos, de acuerdo con diferentes condiciones de pH y Eh. De acuerdo con Föstner (citado en Galán & Romero, 2008), los diferentes compuestos que pueden contener metales en su estructura (óxidos, sulfuros, carbonatos) son estables en pH circumneutrales a alcalinos, (Figura 64) es que decir tienen baja solubilidad bajo esas condiciones. En otras palabras, a pH ácidos, menores a 5, la solubilidad de los metales pesados aumenta con excepción del cromo, con tendencia creciente a medida que el pH disminuye (Figura 65).

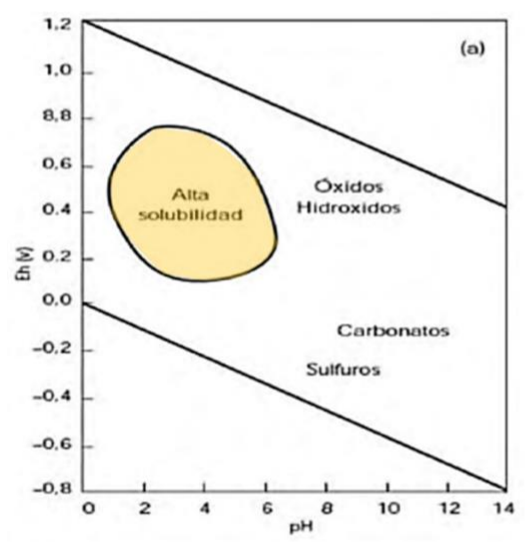


Figura 64. ESTABILIDAD DE COMPUESTOS QUE CONTIENEN METALES
FUENTE GALÁN & ROMERO, 2008

FIGURA 65. TENDENCIA DE INCREMENTO EN LA SOLUBILIDAD DE METALES PESADOS CON LA ACIDIFICACIÓN.
FUENTE GALÁN & ROMERO, 2008

Esto quiere decir que a valores de pH bajos (menores a 4), generados por la oxidación de la pirita, facilitan la disolución de metales asociados a los sulfuros o hidrolizados de hierro que están presentes en el sistema, y los mantienen en solución permitiendo que se dispersen en el ambiente llevados por las corrientes de aguas ácidas superficiales. Además, estas condiciones de pH también mantienen en Fe^{+3} en solución lo cual favorece aún más la oxidación de estos sulfuros.

Por esta razón, tanto los metales como los sulfatos van aumentando su concentración a medida que el pH disminuye, alcanzando así valores de concentración de hasta 1'000.000 mg/l para sulfatos y 100.000 mg/l para los metales (INAP,2009). Según Eckenfelder (2000[150]), en valores de pH menores a 3 o mayores a 12, metales pesados como el cobre (Cu), plomo (Pb), cadmio (Cd), níquel (Ni), zinc (Zn) y cromo (Cr) se disuelven en el medio.

Para el interés particular de este trabajo, se debe entender el comportamiento del cobre y arsénico, dado que, de acuerdo con las características del depósito, serían los dos elementos principales

[150] Eckenfelder, W. W. (2000). Industrial Water Pollution Control. Tercera Edición. Pág. 105



adicionales a la mena, más abundantes y con implicaciones ambientales. El diagrama Eh-pH para el sistema Cu-S (Figura 66) muestra que el cobre en solución (Cu^{+2}) se encuentra restringido a pH extremadamente ácidos, menores a 4, y ambientes muy oxidantes. En el caso del arsénico (Figura 67), ambas especies, arsenito (As III) y arsenato (As V) se encuentran en solución en casi todo el rango de pH del drenaje ácido, restringido principalmente por los valores de Eh. Las siguientes imágenes muestran en el polígono rosa los rangos de pH y Eh comunes para las aguas de áreas mineras y por lo tanto las especies de As y Cu que se esperarían en estas condiciones.

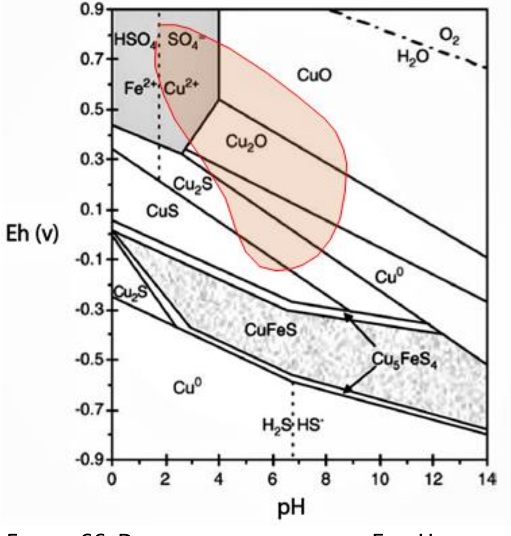


FIGURA 66. DIAGRAMA DE ESTABILIDAD EH-PH PARA EL SISTEMA CU-S

FUENTE: LANGMUIR *ET AL*, 2005

FIGURA 67. DIAGRAMA DE ESTABILIDAD EH-PH PARA EL SISTEMA AS-S

FUENTE: CRAW *ET AL.*, 2003

De acuerdo con Lattanzi *et al* (2007), las aguas que drenan cuerpos con altos contenidos de enargita mineralizados y/o escombreras de estos en yacimientos de Italia, Estados Unidos, Grecia y Hungría, se encuentran enriquecidas con cobre y arsénico (Figura 68) alcanzando concentraciones de cobre de hasta 600 mg/l de Cu. Además, en varios de estos depósitos se ha observado que la relación Cu/As es más alta de lo normal[151] probablemente por la alta solubilidad de minerales secundarios de cobre en comparación con los de arsénico. Por ejemplo, sulfatos de cobre son más solubles que los hidróxidos o sulfatos de arsénico, como la escorodita ($FeAsO_4 \bullet 2H_2O$), por lo que la liberación de arsénico al medio se hace más lenta.

[151] De acuerdo con la reacción estequiométrica es 3



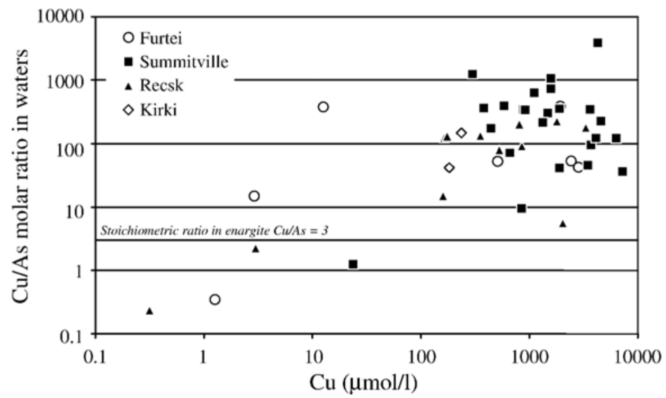


FIGURA 68. CONCENTRACIÓN DE CU Y RELACIÓN CU/AS EN AGUAS DE ESCORRENTÍA EN TAJOS Y ESCOMBRERAS DE YACIMIENTOS RICOS EN ENARGITA.

FUENTE: LATTANZI *ET AL*, 2007

La preocupación alrededor de la liberación de metales pesados y arsénico al medio gira alrededor de un problema de salud pública. Las altas concentraciones de metales pesados en drenajes ácidos de mina conllevan a graves repercusiones en la salud humana, por lo que a continuación se presentan los valores de referencia y los principales efectos nocivos a la salud generados por los elementos que comúnmente se encuentran disueltos en estos drenajes (Organización Mundial de la Salud, 2006[152]):

ELEMENTO	EFECTOS EN LA SALUD
Arsénico	Cancerígeno (particularmente piel, vejiga y pulmones)
Cobre	Efectos gastrointestinales agudos
Cromo	Capacidad cancerígena y genetoxicidad
Cadmio	Daño a los riñones
Plomo	Afecta sistema nervioso central y periférico. Acumulable en huesos.
Níquel	Cancerígeno
Zinc	Fitotóxico
Aluminio	Posible relación con el desarrollo de Alzheimer
Manganeso	Efectos neurológicos adversos

Tabla 11. EFECTOS EN SALUD DE METALES PESADOS Y METALOIDES TÍPICOS DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA.

ELABORACIÓN BASADA EN OMS 2006

Estos elementos suelen quedar expuestos como cationes (con carga positiva) u oxianiones (con carga negativa) lo cual permitirá que sean o no adsorbidos por partículas que se encuentran disponibles en el medio. Para los metales pesados, los principales compuestos adsorbentes son los hidróxidos de hierro y manganeso y la materia orgánica debido a su alta densidad de superficie y capacidad de intercambio catiónico (Langmuir *et al.,* 2005[153]).

---

[152] Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías para la calidad del agua potable. OMS, Ginebra.

[153] Langmuir, D., Chrostowski, P., Vigneault, B. & Chaney, R. (2005). Issue paper on the environmental chemistry of metals. Submitted to: U.S. Environmental Protection AgencyRisk Assessment Forum.



Las cargas de la superficie de los hidróxidos de hierro y manganeso y de la materia orgánica dependen fuertemente del pH del medio teniendo en cuenta que el punto cero de carga[154] de cada uno. El punto cero de carga de los hidróxidos se encuentra en el rango de pH de agua natural, es decir entre 6 y 7, mientras que el de la materia orgánica está por debajo, es decir a pH ácido. Esto significa que la materia orgánica puede adherir especies con carga positiva, como los metales, en pH ácidos, mientras que los hidróxidos solo adhieren estas especies en pH neutros a alcalinos y las liberan en pH ácidos. De acuerdo con esto, si consideramos los ambientes de zonas mineras donde la materia orgánica no es abundante y los pH suelen ser ácidos, tendremos un escenario geoquímico que favorecerá la liberación de metales que hayan sido adheridos a este tipo de compuestos.

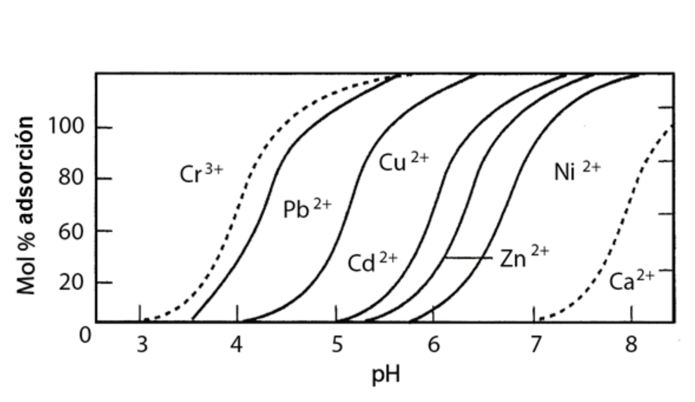


FIGURA 69. PORCENTAJE DE ADSORCIÓN DE METALES POR HIDRÓXIDOS DE HIERRO EN FUNCIÓN DEL PH
FUENTE: LANGMUIR *ET AL.,* 2005

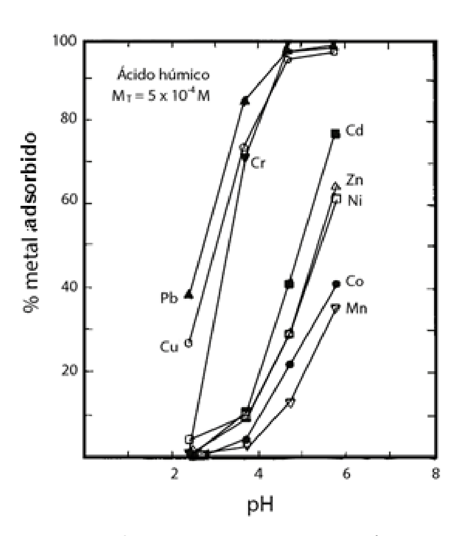


FIGURA 70. PORCENTAJE DE ABSORCIÓN DE METALES POR MATERIA ORGÁNICA DE HIERRO EN FUNCIÓN DEL PH FUENTE: LANGMUIR *ET AL.,* 2005

En la Figura 69 se observa como la adsorción (adherencia) de cada uno de los metales por parte de hidróxidos de hierro disminuye drásticamente al disminuir el pH, al considerar que pasan de 100% a cero en tan solo un orden de magnitud (por ejemplo, de 7 a 6 para zinc). Lo mismo pasa con la materia orgánica (Figura 70), que, aunque es un mejor adsorbente para metales en medios ácidos, es evidente que el porcentaje de adsorción también se ve disminuido a pH extremadamente ácidos, como los de drenaje ácido de mina. Respecto a este último, es importante tener en cuenta que la alteración bien sea por remoción u oxidación de materia orgánica de los suelos, tendría consecuencias significativas en la disponibilidad de metales, ya que es uno de los principales agentes adsorbentes de estos.

En cuanto a metaloides, el arsénico es el más destacado por su alta toxicidad y estrecha relación con aguas que drenan zonas mineras, ya que la enargita (sulfuro de arsénico y hierro) y sus variaciones (luzonita, tennantita y tetraedrita) está comúnmente asociado con la aparición del oro en depósitos magmáticos, hidrotermales y de tipo pórfido (Ospina *et al.,* 2011) y en depósitos de alta sulfuración

[154] Valor de pH al cual la superficie de una partícula cambia de carga: valores menores tendrán carga positiva mientras que valores mayores tendrán carga negativa.



(Camprubi *et al.,* 2003). Su presencia ha sido registrada por varios autores en zonas intervenidas por minería alrededor del mundo, por ejemplo, en relaves abandonados en Chile (Relaves, 2015[155]), en los alrededores de la mina de oro Obuasi en Ghana (Adomako *et al.,* 2010[156]), a lo largo del Cinturón Pirítico en España (Hierro *et al.,* 2014[157]), en la mina de hierro, cobre y zinc de Dabaoshan al sur de China (Zhao *et al.,* 2011[158]), entre otros. En el caso de Colombia, Ángel (2012[159]), Alonso *et al.* (2019[160]) encontraron una relación entre altas concentraciones del arsénico con zonas afectadas por minería en la cuenca del río Suratá, Santander, a partir de mediciones de éste en sedimentos y agua.

El arsénico puede mantenerse soluble en diferentes formas químicas en cualquier rango de pH y Eh, siendo las especies con ion arsenato (As(V)) las predominantes de ambientes oxidantes, y en ambientes suficientemente reductores aquellas con ion arsenito (As(III)) (Gill, 2015[161]). En aguas subterráneas, donde el pH es ligeramente alcalino, el arsenato se encuentra como oxianiones con carga negativa (Figura 71), mientras que el arsenito se encuentra como especie neutra (Figura 72). Cabe resaltar que el arsenato puede encontrarse tanto en pH ácidos como alcalinos, mientras que el arsenito se encuentra restringido a pH neutrales a alcalinos.

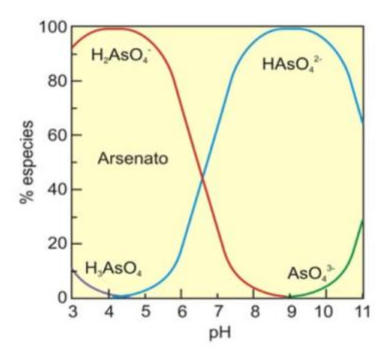


FIGURA 71. ESPECIES DE ARSENATO EN SOLUCIÓN EN FUNCIÓN DEL pH
FUENTE: LILLO, S.F.

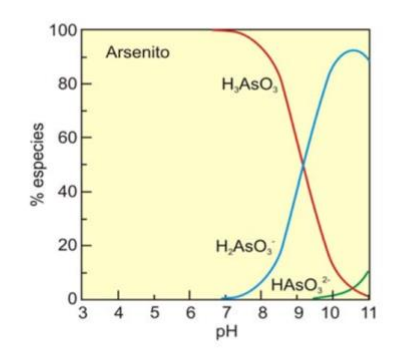


FIGURA 72. ESPECIES DE ARSENITO EN SOLUCIÓN EN FUNCIÓN DEL pH
FUENTE: LILLO, S.F.

Es importante tener en cuenta que según Vaughan (2006[162]) el arsenito y el arsenato son la segunda y tercera especie más tóxica del arsénico, respectivamente, estando solo dos órdenes de magnitud

155 Relaves. (2015). Resumen: Informes de lodos y aguas residuales Región Atacama. Análisis preliminar situación Post - Aluvión III Región Atacama

156 Adomako, E., Deacon, C., & Meharg, A. (2010). Varitions in concentrations of arsenic and other potentiallty toxic elements in mine and paddy soils and irrigation waters from Southern Ghana. Water Quality Expo Health, 10 (29), 115-124

157 Hierro, A; Olías, M; Cánovas, C.R; Martín, J.E; Bolívar, J.P. (2014). Trace metal partitioning over tidal cycle in an estuary affected by acid mine drainage (Tinto estuary, SW Spain). Revista Science of the Total Environment

158 Zhao, H., Beicheng, X., Jianqiao, Q., & Zhang, J. (2011). Hydrogeochemical and mineralogical characteristics related to heavy metal attenuation in a stream polluted by acid mine drainage: A case study in Dabaoshan Mine, China. Journal of Environmental Sciences, 979 - 989

159 Ángel Huerta, A. (2012). Análisis y modelamiento del comportamiento de fluidos líquidos de pilas de escombros en minería de oro. Tesis de Pregrado - Geología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá,

160 Alonso, D; Pérez, R, Okio, C; y Castillo, E. (2019). Assessment of mining activity on arsenic contamination in surface water and sediments in southwestern area of Santurbán páramo, Colombia. Journal of Environmental Management No. 264

161 Gill, R. (2015), Chemical fundaments of Geology and Environmental Geoscience. Tercera edición. Wiley Blackwell

162 Vaughan, D. (2006). Arsenic. En Elements Vol. 2 No. 2.



por debajo del arsano (AsH_3), reconocido por su alta letalidad. De allí la importancia de conocer y controlar la concentración de ambos en el medio. La disponibilidad y movilización del arsénico en el agua dependerá principalmente de dos procesos: 1) adsorción/desorción del arsénico a fases sólidas y 2) precipitación/disolución de la fase sólida.

Los materiales que generalmente adsorben tanto el arsenito como el arsenato a su superficie son óxidos y oxihidróxidos de metales (especialmente hierro, manganeso y aluminio), materia orgánica, carbonatos y arcillas (Lillo, s.f.)[163]. La fuerza de adsorción de las especies de arsénico a estos materiales dependerá de la diferencia de carga entre las especies acuosas, la concentración de las especies arsenicales en solución y la concentración de otras especies iónicas con las cuales el arsénico entraría a competir para ocupar los espacios en la superficie de los materiales adsorbentes.

Las fases sólidas que adsorben mayor cantidad y con más fuerza compuestos de arsénico son los oxihidróxidos de hierro, particularmente la ferrihidrita y la goetita. La ferrihidrita al ser una especie amorfa, tiene mayor densidad de lugares de intercambio y mayor reactividad de grupos funcionales en superficie, por lo que se considera la fase con mayor capacidad adsorbente (Lillo, s.f.). De acuerdo con ensayos realizados por Peña Torres *et al* (2012)[164], las isoterma de adsorción[165] para el arsénico sobre goetita y ferrihidrita se ajustan al modelo Langmuir, es decir que no son lineales, lo que implica que incluso a concentraciones muy bajas de arsénico en la solución, la adsorción de este a la fase sólida va a ser significativamente alta. Sin embargo, algunos factores pueden afectar la adsorción del arsénico (Lillo, s.f.):

- Cambios de pH: valores de pH extremos disminuyen e incluso cancelan por completo la capacidad adsorbente de los oxihidróxidos de hierro. En el caso de pH mayores a 8, la carga superficial de estos compuestos pasa a ser negativa por lo que se comportan como adsorbentes catiónicos. Por otro lado, la ferrihidrita es un compuesto inestable que a pH bajos (ácidos) se disuelve y libera el arsénico. Adicional a esto, de acuerdo con los ensayos de Peña Torres *et al.* (2012) durante el proceso de adsorción de arsénico a los oxihidróxidos se alcaliniza el medio, pasando en ese caso de pH 4,5 a 8,1, por el intercambio iónico de AsO_3^{-3} con grupos OH. En este caso debe reiterarse que estos compuestos de hierro cambian su capacidad adsorbente a catiónica desde pH 8, es decir, que a pH más alcalinos no pueden adsorber aniones, como los arsenatos y arsenitos.

- Cambio de estructura cristalina: En el caso particular de la ferrihidrita, al ser una especie amorfa es más inestable a condiciones ambientales. Por esta razón suele transformarse a su especie cristalina más estable (goetita), lo que implica disminución de su capacidad adsorbente.

[163] Lillo, J (s.f.) Peligro geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas. GEMM - Grupo de Estudios de Minería y Medioambiente

[164] Peña-Torres, A; Cano-Rodríguez, I; Aguilera-Alvarado, A; Gamino-Arroyo, Z; Gómez-Castro, F; Gutiérrez-Valtierra, M & Soriano-Pérez, S (2012). Adsorción y desorción de arsénico en oxihidróxidos de fierro sintéticos como modelo de estudio para explicar uno de los mecanismos de su lixiviación de jales mineros. Revista Mexicana de Ingeniería Química. Vol. 11, No. 3 (2012) 495-503

[165] Representación gráfica de la relación entre la concentración de un determinado componente en solución (fase líquida) con su concentración en la superficie de la partícula (fase sólida).

- Reacciones RedOx: La reducción del arsenato (As V) a arsenito (As III), por ejemplo, por actividad microbiana, puede incrementar la disponibilidad y movilización de arsénico en la solución y en la fase sólida dado que la adsorción sobre el arsenito es más débil.

- Concentración de otros iones: iones con comportamientos geoquímicos similares a los compuestos de arsénico pueden entrar a competir por los espacios de sorción o de intercambio, afectando así su posibilidad de ser adheridos a los adsorbentes, y por lo tanto liberándolos al medio. Algunos de estos iones son fosfatos, molibdeno, selenio, vanadio, entre otros. En este sentido, los ensayos de Peña Torres *et al.* (2012) revelan que la presencia de bicarbonato en solución promueve la liberación de arsénico. Esto se debe a que el ion HCO_3^- desplaza al ion arsenato o arsenito, dejándolo disponible para movilizarse. En este caso particular, el aporte de bicarbonato al agua de escorrentía se da de manera natural por la reacción de los carbonatos en relaves mineros durante época de lluvia.

Todo lo anterior indica que, si bien los sulfuros son el punto de partida de los aportes de arsénico al medio, los minerales secundarios como óxidos, oxihidróxidos, entre otros, También lo son. Cambios en el pH, el Eh o en los iones disponibles dentro del medio pueden afectar el equilibrio de estos compuestos y eventualmente liberar y movilizar arsénico en aguas superficiales y subterráneas.

En el caso de yacimientos minerales con alta concentración de pirita y sulfuros de arsénico, los desechos mineros, tanto botaderos como relaves (o colas o jales) se convierten en la principal fuente de arsénico en las aguas de mina (Paikaray, 2014)[166]. Estos minerales, al estar generalmente diseminados dentro de los cuerpos mineralizados, son difíciles de aislar dentro del proceso de extracción. Por esta razón resultan siendo acumulados en los desechos mineros, bien sea en montañas artificiales de roca poco mineralizada (económicamente hablando) o en los lodos que resultan después del proceso de beneficio de los minerales objetivo (oro, plata, cobre). Adicionalmente, al tratarse de materiales de tamaño de grano muy fino, particularmente los relaves, la superficie de reacción con la atmósfera es mayor, lo que se verá reflejado en un mayor aporte de especies químicas al medio.

De acuerdo con Paikaray (2014), la movilización de arsénico en el medio se da por procesos de meteorización física cuando fases sólidas que tienen arsénico se transportan hasta los depósitos o los suelos, y procesos de meteorización química por la disolución de minerales que contienen arsénico y luego éste se transporta como arsénico iónico. Con respecto al último, Paikara afirma también que los residuos mineros se pueden dividir en tres zonas de acuerdo con el grado de meteorización química (Figura 73):

- Zona extremadamente oxidante:
  Corresponde a aproximadamente los primeros 50 centímetros del tope, y es una zona extremadamente activa para la meteorización, dado que la mayor parte de procesos biogeoquímicos se llevan a cabo en la interfase agua-sedimento-aire.
- Zona intermedia:

166 Paikaray, S (2014). Arsenic Geochemistry of Acid Mine Drainage. Mine Water Environ Vol. 34:181–196



Allí los residuos no están en contacto directo con la atmósfera, sino que reciben el oxígeno de las aguas superficiales que se infiltran o del nivel freático fluctuante.

- <u>Lixiviación a agua subterránea</u>
  La parte más inferior de los residuos se encuentra la mayor parte del año saturada, por lo que mantiene una uniformidad fisicoquímica relativa.

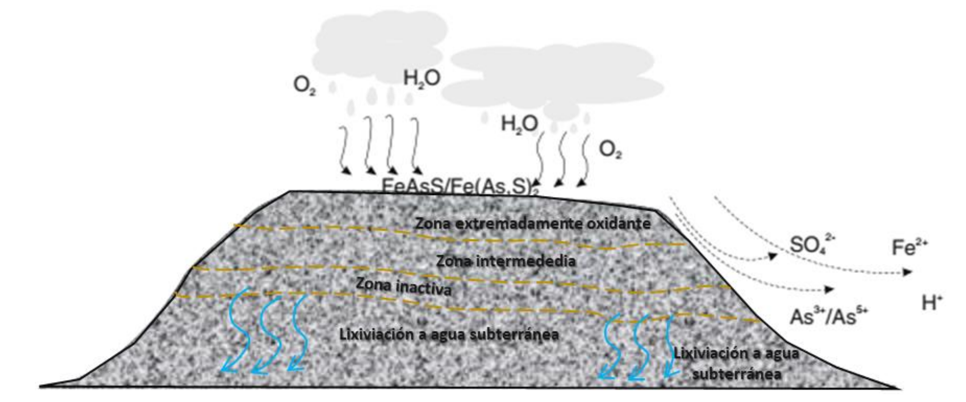


FIGURA 73. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE ZONACIÓN POR METEORIZACIÓN QUÍMICA DE RESIDUOS MINEROS MODIFICADO DE PAIKARAY, 2015

En cuanto a la permanencia del arsénico en el medio, dado que este puede estar soluble en diferentes especies a diferentes condiciones de pH y Eh, se transporta fácilmente a lo largo de cuencas llegando a ser acumulado a kilómetros de distancia de su fuente. Un ejemplo de esto es el caso de Bangladesh, donde desde la década de los 90 se detectó contaminación por arsénico en más del 25 % de pozos de agua potable encontrándose las concentraciones más altas en los acuíferos más cercanos a la costa, pese a que la fuente de éste se encuentra en la parte alta de la cuenca. El arsénico suele acumularse en el agua subterránea debido a que esta se mueve lentamente, razón por la cual en Bangladesh las concentraciones más altas se encontraban en los acuíferos costeros donde el gradiente hidráulico es más bajo (BGS & DPHE, 2001[167]).

La manera en la que el arsénico es liberado y transportado a lo largo de la cuenca en Bangladesh fue estudiada por el British Geological Survey y el Department of Public Health Engineering en 2001. De acuerdo con los estudios realizados se concluyó qué el arsénico proviene de la oxidación de pirita y arsenopirita en la parte más alta de las cuencas, la cual libera arsenato (As(V)) que, bajo condiciones oxidantes y a pH de agua natural, se transporta por los ríos adherido a hidróxidos de hierro hasta depositarse en las llanuras de inundación cerca de la costa donde, por oxidación de materia orgánica, cambia a un ambiente reductor y se reduce a arsenito (As (III)).

3.1.3 Fuentes de drenaje ácido de mina

Teniendo en cuenta que la generación de drenaje ácido de mina va a estar relacionada primordialmente con la oxidación de la pirita (y algunos otros sulfuros) que se encuentra en la roca

[167] British Geological Survey & Department of Public Health Engineering (2001) Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh. Kinniburgh, D & Smedley, P (Editors) Volume 2: Final report. British Geological Survey Report WC/00/19 British Geological Survey, Keyworth.



removida y expuesta al aire y agua, se pueden definir cuatro fuentes de generación las cuales cumplen con dichas condiciones (Dold, 2003):

***Botaderos**:* Montañas artificiales conformadas por lo que se denomina "desecho de roca", es decir la roca no mineralizada (o no lo suficiente) y que por consiguiente no hará parte del proceso de beneficio del mineral objetivo. El nombre supuestamente técnico de zonas de disposición de "estériles" con que se denominan de manera eufemística los botaderos ocultan que no son estériles sino materiales de intensa reactividad geoquímica[168].

La fragmentación de la roca que conforma los botaderos los convierte en la principal fuente de drenaje ácido de mina ya que los espacios vacíos que se encuentran en esta acumulación de material permitirán el paso del agua y aire al interior del material. Esto permitirá la oxidación de los sulfuros que se encuentran allí pero que previo a la explotación no habían estado en contacto con la atmósfera.

Por ejemplo, de acuerdo con la recopilación hecha por Kuipers *et al.* (2006[169]) varias de las minas evaluadas subestimaron los impactos que podrían generarse por lixiviación de aguas provenientes de los botaderos. Algunos ejemplos son:

Greens Creek (Alaska): Mina de oro, plata, plomo y zinc donde se encontraron altas concentraciones de zinc, pH bajo y concentración alta de sulfatos en corriente proveniente de botaderos y cursos de agua cercanos.
Jamestown (California): Mina de oro donde el agua subterránea se encuentra afectada por incremento en la concentración de sulfatos, nitratos, TDS y arsénico, excediendo los límites de agua potable.
McLaughlin (California): Mina de oro donde se evidenció un aumento en la concentración de sulfatos, hierro y manganeso en agua subterránea y ocasionalmente de arsénico, cromo, cobre, plomo, manganeso, mercurio, hierro y zinc en agua superficial.

***Depósitos de relaves**:* Son grandes acumulaciones de los residuos que se generan luego del proceso de beneficio de la roca mineralizada, es decir, son los lodos (cianurados y con valores de pH superiores a 10 en los casos donde el proyecto minero involucra el beneficio de oro) y con presencia de sulfuros que ya no son económicos para el proyecto. En cuanto al volumen que pueden llegar a tener estos residuos, Dold (2003) afirma que *"El volumen de los relaves en relación con todo el mineral procesado puede variar entre el 60 y 80% en el caso de yacimientos del tipo sulfuros masivos de Pb-Zn; entre 97 y 99,5% en el caso de pórfidos cupríferos, y 99,9% en el caso de yacimientos de oro"*.

Durante la operación de un dique de relaves se espera que éste se encuentre completamente saturado, es decir, sin posibilidad de que los sulfuros que allí se encuentran entren en contacto con el aire y empiecen a oxidarse. Sin embargo, cuando empiezan a generarse zonas insaturadas dentro del dique de relaves se permite el paso del oxígeno por dichas zonas y empiezan a oxidar los sulfuros que allí se encuentran, por lo que este depósito que en un principio tenía pH muy alcalino (alrededor de 10) pasará a pH ácidos a muy ácidos, dependiendo

---

168 El sector minero denomina "estériles" a estos desechos que suelen ser muy reactivos geoquímicamente

169 Kuipers, J.R., Maest, A.S., MacHardy, K.A., and Lawson, G. (2006). Comparison of Predicted and Actual Water Quality at Hardrock Mines: The reliability of predictions in Environmental Impact Statements.



de la cantidad de sulfuros disponibles a oxidarse. Estos sulfuros suelen estar asociados a las partículas más gruesas del depósito que se encuentran cerca del punto de depositación (Dold, 2003).

Según estudios realizados por Dold (2014)[170] en la presa activa de relaves Talabres de la mina de cobre Chuquicamata (Desierto de Atacama, Chile) se registraron cambios de pH de 9,1 (relave fresco) a 6,4 - 7,5 a los tres años, 4,7 a los 4 años y finalmente 3,9 a los 5 años. Es decir que en tan solo 5 años (estando aun activa la presa de relaves) la acidez de los relaves aumento 100.000 veces en comparación a las condiciones químicas con las cuales fueron dispuestos en un principio.

- ***Tajos de mina y minas subterráneas:*** Se describen ambas fuentes de generación ya que el proceso que se da en cada una es similar.

Tanto en los tajos de minas a cielo abierto como en las galerías, túneles y cámaras de una mina subterránea, se exponen a los agentes atmosféricos superficies de roca que antes no lo estaban lo cual inicia el proceso de oxidación de los sulfuros asociados a la roca y la consecuente formación de aguas ácidas.

Otro factor que puede favorecer la generación de aguas ácidas alrededor de un proyecto minero es el abatimiento del nivel freático. La pirita y demás sulfuros son estables bajo condiciones reductoras, es decir, donde no tienen ni han tenido contacto alguno con el aire. Cuando estos minerales son expuestos al aire, particularmente al oxígeno molecular, se empiezan a oxidar de manera inmediata y se inicia todo el proceso descrito previamente.

Teniendo en cuenta que el nivel freático representa la profundidad a la que el subsuelo se encuentra completamente saturado por agua, se espera que los materiales que se encuentran por debajo de éste han estado en condiciones reductoras. La construcción de túneles, galerías mineras o cualquier cavidad en subsuelo cambia la dirección de flujo del agua subterránea generando un descenso del nivel freático en el área intervenida lo que deja expuesto ahora grandes volúmenes de roca o sedimentos con minerales de sulfuros metálicos a condiciones oxidantes.



FIGURA 74. OXIDACIÓN DE ROCA POR ABATIMIENTO DE NIVEL FREÁTICO.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Por ejemplo, una de las razones de la alta concentración de arsénico en agua subterránea en Bangladesh es la oxidación de depósitos ricos en pirita y arsenopirita por abatimiento del nivel

[170] Dold, B. (2014). Evolution of Acid Mine Drainage formation in sulphidic mine tailings. Journal Minerals No. 4, 621 -641. Suiza.

freático por sobreexplotación de agua subterránea en la parte alta de la cuenca (BGS & DPHE, 2001). En Perth, oeste de Australia, se midió en agua subterránea pH de hasta 1,9 e incremento en la concentración de arsénico y aluminio debido a la oxidación de minerales sulfurosos de una turbera al descender el nivel freático dos metros por un largo periodo de bajas precipitaciones (Appleyard *et al.,* 2004[171]).

Respecto a la contaminación de agua superficial y el riesgo de mezclar esta con fuentes de agua natural, un estudio más reciente de Maest *et al.* (2020)[172] evalúa las condiciones geoquímicas futuras en tajos del proyecto minero de cobre Pebble Mine en Alaska, Estados Unidos, y el riesgo de que estos alcancen uno de los principales ríos del área 20 a 78 años después del cierre del proyecto. Según los resultados de la modelación se espera que en los lagos artificiales que se formen en los tajos abandonados alcanzarían valores de pH de 3,5 y concentraciones de cobre de hasta 130 mg/l, luego del cierre de la mina. Se observan también valores de concentración elevados de aluminio, hierro, sulfatos y zinc. Con estas condiciones hidrogeoquímicas, y la modelación hidrológica del área, se tiene un potencial riesgo de afectación de fuentes de agua natural significativas, y en un escenario donde las empresas mineras ya se han ido del territorio.

3.2 Revisión del EsIA y datos tomados en campo

En esta sección se describen los principales aspectos relacionados con la calidad del agua superficial y subterránea a los alrededores del proyecto Loma Larga, con base en la información suministrada por la empresa en el EsIA, información de referencia y datos de campo que se tomaron en junio del 2022 por profesionales de Terrae.

3.2.1 Términos de referencia

Hasta la fecha de elaboración del presente informe no se cuenta con los Términos de Referencia aprobados por la autoridad ambiental para la elaboración de los estudios ambientales del proyecto Loma Larga.

Sin embargo, de acuerdo con lo mencionado en el numeral **3.4.1 Alcance Técnico**, el EsIA para el proyecto Loma Larga define su alcance técnico de acuerdo con los siguientes documentos:

- *Artículo 176 del Código Orgánico del Ambiente (CODA), publicado en el Registro Oficial No. 983, del 12 de abril de 2017.*
- *Reglamento al Código Orgánico del Ambiente, que fue emitido mediante Decreto Ejecutivo No. 752, el 21 de mayo de 2019, y publicado en el Registro Oficial Suplemento No. 507, el 12 de junio de 2019.*
- *Artículo 18 del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), publicado en el Registro Oficial No. 725, del 16 de diciembre de 2002, que entró en vigor desde su publicación, fue ratificado mediante Decreto Ejecutivo No. 3516, siendo publicado íntegramente en la Edición especial del Registro Oficial No. 51, del 31 de marzo de*

---

[171] Appleyard, S., Wong, S., Willis-Jones, B., Angeloni, J & Watkins, R. (2004). Groundwater acidification caused by urban development in Perth, Western Australia: source, distribution, and implications for management. Australian Journal of Soil Research, 2004, 42, 579–585

[172] Maest, A; Prucha, R and Cobus, C. (2020) Hydrologic and Water Quality Modeling of the Pebble Mine Project Pit Lake and Downstream Environment after Mine Closure. Minerals 2020, 10, 727



2003. Este, entre sus modificaciones, considera lo estipulado en el Acuerdo Ministerial No. 109 (Publicado en el Registro Oficial edición especial No. 640, del 23 de noviembre de 2018) y el Acuerdo Ministerial No. 013 (Modificación parcial al A. M. 109), publicado el 14 de febrero de 2019, el cual reforma al Acuerdo Ministerial No. 061.

- *Reglamento Ambiental para Actividades Mineras (RAAM), que fue emitido mediante Decreto Ejecutivo No. 121, el 4 de noviembre de 2009, y publicado en el Registro Oficial No. 067, el 16 de noviembre de 2009; fue reformado íntegramente mediante Acuerdo Ministerial No. 037 del MAE, emitido el 24 de marzo de 2014 y publicado en el Segundo Suplemento del Registro Oficial No. 213 del 27 de marzo de 2014; posteriormente, reformado parcial y puntualmente, en varias ocasiones, entre estas por el Acuerdo Ministerial No. 109, publicado en el Registro Oficial No. 64 del 23 de noviembre de 2018. Definición de Área de Influencia*

Dado que son los únicos lineamientos ambientales con los que se cuenta al momento de realizar esta evaluación, a continuación, se resaltará en cada uno de ellos lo relacionado con la caracterización y monitoreo de calidad del agua y la pertinencia de sus exigencias.

- Artículo 176 del Código Orgánico del Ambiente (CODA)
  Dicho artículo trata únicamente sobre la necesidad de cumplir con el proceso de regularización ambiental cuando un proyecto, obra o actividad que ya cuenta con autorización va a realizar una modificación o ampliación. No cuenta con información específica al tema que es evaluado en este capítulo.

- Reglamento al Código Orgánico del Ambiente
  En este documento se establecen principios y normas de relevancia para la evaluación del proyecto minero de Loma Larga. El primero se refiere al *LIBRO SEGUNDO PATRIMONIO NATURAL - TÍTULO VII ECOSISTEMAS FRÁGILES – CAPÍTULO II PÁRAMOS,* donde el artículo 261 establece que:

  > *"(…)*
  > *b) Las actividades en los páramos deben desarrollarse en forma sostenible y ser compatibles con los objetivos de provisión de servicios ambientales esenciales que garanticen el mantenimiento de las poblaciones locales y la conservación de la biodiversidad.*
  > *c) La Autoridad Ambiental Nacional promoverá el desarrollo de acciones orientadas a estimular la investigación científica, la asistencia técnica, la transferencia e intercambio tecnológico, así como el fortalecimiento, la conservación y la protección de los conocimientos ancestrales y tradicionales, como elementos fundamentales para gestión y conservación de los ecosistemas de páramos. (…)*
  > *e) Los ecosistemas de páramo cumplen una función fundamental para el desarrollo del país y el bienestar de la población por las fuentes hídricas contenidas en ellos y la cantidad de carbono que albergan, por lo cual en aquellas áreas alteradas por actividades humanas o naturales y que se determinen como prioritarias para la conservación, la Autoridad Ambiental Nacional deberá fomentar la restauración ecológica.*
  > *(…)"* (subrayado fuera de texto)

  De acuerdo con las anteriores afirmaciones, la idea de desarrollar un proyecto de minería de metálicos en un ecosistema vulnerable como lo es el páramo va completamente en contravía a lo que define el reglamento. Particularmente lo que concierne al literal e, el cual

pretende proteger y conservar estos ecosistemas al ser fuentes hídricas de gran importancia. De acuerdo con lo expuesto en el capítulo anterior, la minería de metálicos implica impactos inevitables y muchas veces irreversibles sobre la calidad de aguas superficiales y subterráneas.

El segundo tema para destacar dentro del reglamento se encuentra en el *LIBRO TERCERO CALIDAD AMBIENTAL – CAPÍTULO IV LICENCIA AMBIENTAL*. En los artículos 433, 434 y 435 se describe de manera muy generalizada lo que debe incluir un EsIA y los PMA, aclarando que estos deben *"ser elaborados por consultores ambientales calificados y/o acreditados, con base en los formatos y requisitos establecidos por la Autoridad Ambiental Nacional en la norma técnica expedida para el efecto"* (EIA (subrayado fuera de texto).

- Reglamento Ambiental para Actividades Mineras:
  De acuerdo con el artículo 21 de este reglamento, el proponente debía presentar los términos de referencia a la Autoridad Ambiental para realizar el EsIA. Sin embargo, el proyecto Loma Larga no tuvo que presentarlos para la fase de explotación dado que **el 23 de noviembre del 2018, mediante acuerdo ministerial, eliminaron la obligación, para titulares mineros, de presentar los términos de referencia de los EsIA**.

  Dicha medida es desde toda perspectiva inconveniente. Si bien la empresa había presentado TdR para la fase exploratoria, las actividades que se desarrollan durante la fase de explotación son completamente diferentes. Debe entenderse que los TdR son instrucciones mínimas que obligan a las empresas que pretenden ejecutar los proyectos, a caracterizar el medio a ser intervenido y plantear acciones de prevención y mitigación.

  Este documento debería incluir aspectos como la escala a la cual deben ser identificados cuerpos de agua y número o densidad de muestras de agua, suelo y/o sedimentos que deben ser caracterizados para tener una adecuada caracterización del medio. Dejar a discreción de las empresas estas instrucciones da lugar a que omitan elementos o características que pueden llegar a perjudicar la aprobación de sus proyectos. Dicho escenario se ha evidenciado en el actuar de diferentes empresas mineras en proyectos desarrollados o que se pretenden desarrollar en toda Latinoamérica y en lugares de Europa oriental, África y Asia.

3.2.2 Definición del área de estudio y área de influencia

Como se ha mencionado previamente, el área geográfica (operativa) del proyecto Loma Larga está delimitada más en función de evitar un traslape con el Área Nacional de Recreación Quimsacocha, perteneciente al SNAP que por soportes técnicos. De acuerdo con los reparos manifestados en el capítulo de Hidrogeología del presente informe, la delimitación del área de estudio desde la perspectiva de agua superficial coincide con elementos naturales como lo son las cuencas y microcuencas de las corrientes de agua que allí se encuentran.

Sin embargo, para el agua subterránea esta delimitación restringe significativamente el área que podría verse afectada por las actividades del proyecto. Esta delimitación debería tener en cuenta elementos que definen los cuerpos de agua subterránea como lo es la geología estructural y la geomorfología, y no solo el área circundante al cuerpo mineralizado. Desde la perspectiva de calidad del agua, la falta de rigurosidad al definir los cuerpos de agua superficial y subterránea que podrían



afectarse por las actividades mineras implica que se dejen por fuera de la caracterización y eventual monitoreo, cuerpos de agua superficial y subterránea que pueden verse afectados a lo largo de la ejecución del proyecto.

Adicionalmente, la manera en la que están planteadas las zonas de estudio superficial y subterránea desconoce que existe una conexión entre el agua superficial y la subterránea. El área donde se pretende desarrollar el proyecto Loma Larga se encuentra sobre rocas ígneas que no son porosas, pero sí están fuertemente fracturadas generando caminos de conexión entre ambos niveles. Además, los suelos que se encuentran en el páramo tienen una capacidad de infiltración significativa para considerarse como una conexión entre el agua superficial y la subterránea. En este sentido, procesos geoquímicos que se dan en la superficie o en los primeros centímetros o metros del subsuelo, pueden tener también repercusiones en los niveles de agua subterránea más profundos, por procesos de infiltración y lixiviación.

La imprecisión en la delimitación del área de estudio subterránea impide que se identifiquen estos impactos oportunamente, configurándose prácticamente un pasivo ambiental si se considera la dificultad y los altos costos que implica la recuperación o limpieza de aguas subterráneas.

3.2.3 Caracterización de Línea base

A continuación, se realiza la evaluación de la información suministrada por la empresa minera respecto a la calidad del agua superficial, calidad del agua subterránea y suelos en el área de estudio. No obstante, es importante aclarar que para la fecha en que este informe fue elaborado y entregado, no fue posible acceder al Anexo C del EsIA, en el cual se encuentra el documento "Respaldos de línea base, C.1 Físico, C.1.20". Por lo tanto, se cuenta únicamente con la información consignada en el informe, más no con los resultados de laboratorio directamente.

3.2.3.1 Geoquímica de rocas y pruebas de potencial de acidificación

Antes de describir las condiciones fisicoquímicas del agua superficial y subterránea del área alrededor del proyecto Loma Larga, se hará una mención a las características geoquímicas de las rocas que se encuentran en el subsuelo.

La geoquímica del agua es un reflejo de la interacción de esta en superficie y en el subsuelo con los materiales geológicos disponibles, involucrando una serie de reacciones alrededor de la meteorización de estos materiales. De allí surge la necesidad de conocer en detalle la composición de estos materiales dado que pueden configurarse como fuente de contaminación si las condiciones ambientales del área cambian, como intensificación de procesos de meteorización por descenso de nivel freático o exposición de grandes volúmenes de roca.

Como se describió en el marco teórico de este capítulo, uno de los principales problemas de la minería de metálicos es la generación de drenaje ácido de mina, precisamente porque contribuye a la liberación de metales por oxidación de minerales de sulfuro en las rocas mineralizadas. Por esta razón, en la sección *6.1.2.2.2 Geoquímica de Rocas y Condiciones de Calidad del Agua Subterránea en el PMLL* se describen las pruebas de potencial de acidificación y liberación de metales que se realizaron en el marco del proyecto Loma Larga.

De acuerdo con el EsIA, se realizaron pruebas estáticas y cinéticas, las cuales se describen así:



"La prueba estática es simplista y clasifica la roca como no generadora de ácido o potencialmente generadora de ácido. Esta clasificación se basa en la presencia de minerales generadores de ácido, como la pirita, y la presencia de minerales neutralizantes, como la calcita. Las pruebas cinéticas son más rigurosas y se realizan en un laboratorio donde se permite que las muestras de cada tipo de roca pueden reaccionar con el agua durante muchos ciclos de humedecimiento y secado. A partir de las pruebas cinéticas, las tasas de generación de ácido y la masa total de cada metal liberado en el agua se cuantifican en una tasa de liberación de masa (mass release rate)"

No obstante, la importancia de esta información, y la necesidad de transparencia en un EsIA de una actividad perturbadora como la minería, en el informe no se muestran los resultados de dichas pruebas, lo que permitiría que terceros o la autoridad que revisa la información se restrinja a la interpretación de la empresa y no interpretar los resultados de laboratorio.

Los únicos resultados que se muestran son las predicciones de la química del agua basadas en las pruebas cinéticas y estáticas, junto con los resultados de flujo de agua subterránea. La tabla 6-122 muestra tres escenarios de predicción categorizados como *baja, base y alta*, que *"corresponden a los rangos de la química de agua observadas en el muestreo de campo y los resultados de laboratorio"* y no se explica más a fondo a que corresponden o como se definen cada uno.

Además, estas predicciones toman únicamente en cuenta el agua subterránea omitiendo así los diferentes procesos de meteorización que pueden darse en superficie y que pueden llegar a afectar las fuentes de agua superficial en el área de estudio. Es evidente que la exposición temporal o permanente de rocas altamente mineralizadas van a experimentar una serie de reacciones que liberarán elementos que serán transportados principalmente por aguas de escorrentía. El omitir este comportamiento genera un impacto no controlado dentro del programa definido por la empresa minera.

Con respecto a esto, vale la pena resaltar que el estudio no cuenta con un modelo de transporte de contaminantes particularmente de metales pesados, y no se menciona que se haya tomado en cuenta en las predicciones que presentan. Los metales pesados tienen un comportamiento geoquímico particular que incluye la adsorción de estos a los sedimentos, por lo que es necesario generar modelos particulares para estos. De acuerdo con Ruiz Jaramillo (2017[173]), la modelación de metales pesados disueltos en los ríos debe considerar que estos se encuentran en dos fases: disueltos en la columna de agua y en partículas en la cama de sedimentos. En este mismo sentido, Hernández Ángulo (2020) plantea la importancia de incluir modelos de especiación química de metales previo a la modelación de transporte con el fin de entenderlas interacciones de estos con los demás componentes del sistema y así simplificar el modelo de transporte

Finalmente, al ir directamente a los resultados de las predicciones, y al desconocerse los resultados de las pruebas de laboratorio, se genera desconfianza al ver que por ejemplo los valores en los escenarios del arsénico son más bajos que lo medido en el agua superficial y subterránea en la caracterización de línea base. No tiene mucho sentido que después de exponerse la roca a condiciones que intensifican procesos de meteorización estos valores de concentración en el agua

[173] Ruiz Jaramillo, L. (2017). Implementación de un modelo de calidad de agua aplicable a la simulación de metales pesados en corrientes con caso de estudio en la cuenca del río Negro. Tesis de Maestría en Ingeniería ambiental. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia



se mantengan e incluso disminuyan. Esto solo reitera la necesidad de conocer la información completa, incluyendo los resultados de laboratorio, para realizar una interpretación de la información sin sesgos de quien está involucrado en el proceso.

3.2.3.2 Agua superficial

De acuerdo con el EsIA presentado por la empresa, la línea base para la calidad del agua superficial se hizo con base en una red de monitoreo de 23 puntos ubicados principalmente en el ecosistema de páramo y un punto en el bosque montano. A su vez, los puntos se encuentran en cinco cuencas o unidades hidrográficas: quebrada Alumbre, quebrada Bermejos, Río Cristal, quebrada Rumiguaycu y quebrada Quinuahuaycu (Tabla 6).

Código	**Cuerpo de Agua**	**Periodo de caracterización**													**Unidad Hidrográfica**	**Ecosistema**
		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020		
MACCP	Qda Alumbre														Alumbre	Páramo
MA7	Qda S/N															Páramo
JOR	Qda Alumbre															Páramo
MAP	Qda Alumbre															B. montano
B1	Qda. S/N (af. de la Bermejos)														Bermejos	Páramo
B2	Qda. S/N (af. de la Bermejos)															Páramo
B3	Qda. S/N (af. de la Bermejos)															Páramo
MAZHA	Qda S/N														Cristal	Páramo
MAZH	Qda S/N															Páramo
TAS	Río Cristal															Intervenc.
MAR	Qda S/N														Rumiguaycu	Páramo
MAK	Qda S/N															Páramo
MA3	Qda Rumiguaycu															Páramo
MA4	Qda Rumiguaycu															Páramo
MAQA	Qda S/N														Quinuahuaycu	Páramo
MACHT	Qda S/N															Páramo
MA1.1	Qda S/N (af. de Quinuahuaycu)															Páramo
MA1.2	Qda S/N (af. de Quinuahuaycu)															Páramo
MA1.3	Qda S/N (af. de Quinuahuaycu)															Páramo
MA1	Qda Quinuahuaycu															Páramo
QUIV	Qda Quinuahuaycu															Páramo
MA2	Qda Quinuahuaycu															Páramo

FRECUENCIA DE MONITOREO: ROJO: UN MONITOREO/ANUAL, NARANJA OSCURO: SEMESTRAL, NARANJA CLARO: CUATRIMESTRAL, AMARILLO: TRIMESTRAL, VERDE CLARO: BIMENSUAL, VERDE OSCURO: MENSUAL, GRIS: NO HAY INFORMACIÓN.

Tabla 12. ESTACIONES DE CARACTERIZACIÓN DE LÍNEA BASE PARA CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL

FUENTE: EsIA (INV METALS - CARDNO ENTRIX, 2021)

Lo primero que sale a relucir con la tabla anterior es la **falta de periodicidad en el monitoreo de la mayoría de las estaciones para agua superficial**. En teoría hay información sobre la calidad del agua superficial en el periodo 2008 a 2020, sin embargo, tan solo cinco estaciones cuentan con



información de seis años consecutivos, mientras seis estaciones tan solo tienen información del año 2020. Además, si se tiene en cuenta la frecuencia con la que se hicieron las mediciones en cada uno de los años, el escenario empeora. Todas las estaciones cuentan con una sola medición para el año 2020, mientras que la mitad de las estaciones que tienen información en los años 2017 y 2018 cuentan con mediciones semestrales y para el 2012 y 2013 la mitad tienen mediciones anuales. Adicional a esto, la información suministrada por la empresa no es clara. Las tablas 6.107 y 6.108 muestran los años donde hubo monitoreo y la frecuencia con la que se hizo en cada uno, respectivamente. Sin embargo, en varias estaciones la información es contradictoria, reportando frecuencias en años donde pareciera no hubo monitoreo, y viceversa. Resulta irresponsable que con todo lo anterior, la empresa se atreva a concluir lo siguiente:

> *"En la zona de estudio se han realizado monitoreos en un período de 12 años (Tabla 2); por lo que se cumple con lo especificado en las recomendaciones del Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador en base a la "Guía para elaboración de estudios de impacto ambiental (EIA) sector minero"."* (subrayado fuera del texto)

Particularmente la cuenca de la quebrada Bermejos (estaciones B1, B2 y B3) está sin información que permita plantear una línea base adecuada para la calidad del agua superficial, lo cual genera alta preocupación al ser una unidad hidrogeográfica que se encuentra justo aguas abajo al costado oeste del yacimiento y por consiguiente del área de operación (Figura 75). Lo mismo sucede con el segmento superior de la quebrada Quinuahuaycu (estaciones MA1.1, MA1.2 y MA1.3) que también se encuentran aguas abajo del área de operación, pero al costado este, y solo cuenta con información del 2020. Respecto a esto, en el informe afirman que:

> *"Los únicos puntos que fueron caracterizados en un solo muestreo fueron B1, B2, B3, MA1.1, MA1.2 y MA1.3; sin embargo, luego de analizar las muestras estos puntos tienen tendencias similares a las unidades hidrográficas o cuencas circundantes por lo cual la caracterización de calidad de agua en estos puntos se consideró similar y representativa para la zona"* (subrayado fuera de texto)

Es irresponsable concluir que la caracterización del agua superficial de una cuenca completa es "*similar y representativa*" a las que se encuentran alrededor con solo una medición hecha en el último año. Se requiere contar con información de varios años para evaluar la variabilidad de los diferentes parámetros fisicoquímicos del agua de acuerdo con los cambios de verano a invierno, y a la interacción natural del agua con los materiales geológicos de la cuenca.



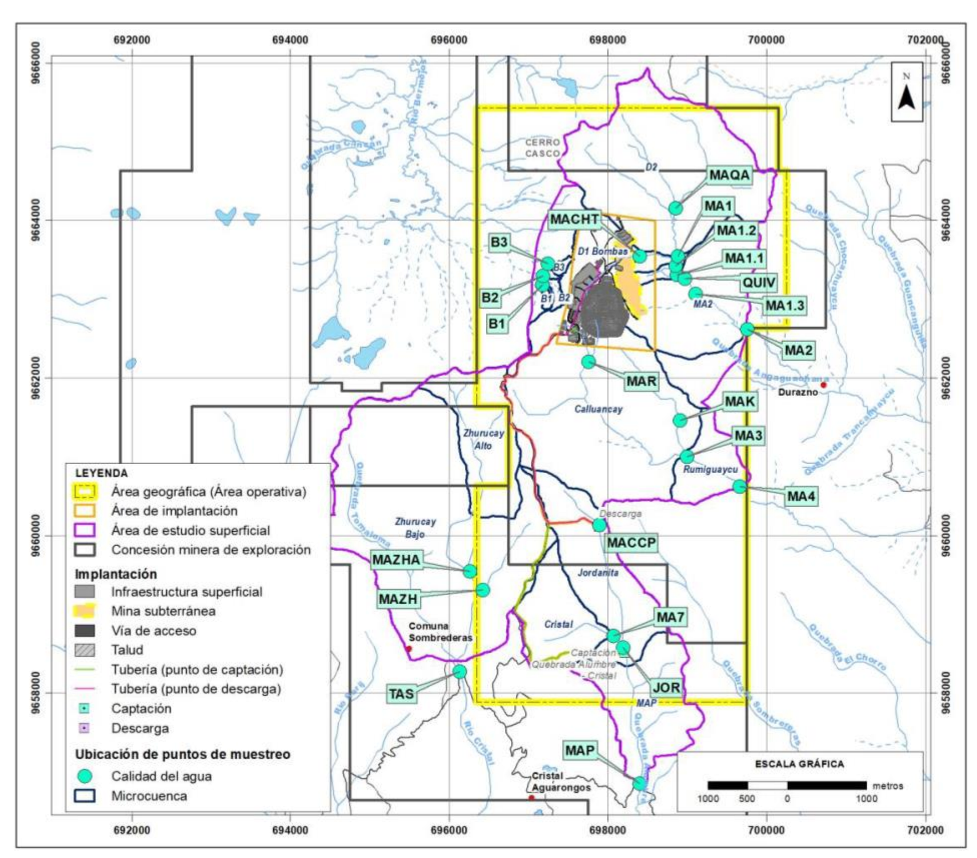


FIGURA 75. PUNTOS DE MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL

FUENTE: ESIA (INV METALS - CARDNO ENTRIX, 2021)

Con relación a la distribución de los puntos de caracterización de agua superficial, también llama la atención estos están restringidos a quebradas y ríos. Es decir, ninguno de los 23 puntos de la red de monitoreo se encuentra sobre un cuerpo lénticos dentro del área de estudio. Al tener dinámicas de flujo y sedimentación muy diferentes, los cuerpos lénticos como lagos o lagunas responden muy diferente ante actividades antrópicas como la minería.

Los ecosistemas lacustres son especialmente susceptibles a la contaminación antrópica, ya que son receptores de un gran número de contaminantes que se desplazan por medio del agua. Por ejemplo, la acumulación de Contaminantes Orgánicos Persistentes en los sedimentos (como HAPs[174] o PCBs[175]) puede atribuirse a dos factores: 1) su carácter hidrofóbico que les permite unirse a la materia orgánica y acumularse en los sedimentos, y 2) la baja susceptibilidad a la degradación microbiana debido a su fuerte sorción y envejecimiento (Li et al., 2019)[176]. De ahí la importancia de incluirlos dentro de la caracterización de línea base de agua superficial y eventualmente dentro de las redes de monitoreo durante la ejecución de un proyecto minero.

---

[174] Hidrocarburo aromático policíclico

[175] Bifenilos policlorados

[176] Li, A., Beek, T. aus der, Schubert, M., Yu, Z., Schiedek, T., & Schüth, C. (2019). Sedimentary archive of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and perylene sources in the northern part of Taihu Lake, China. Environmental Pollution, 246, 198–206. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.112

En cuanto a los parámetros analizados, los valores obtenidos en el monitoreo se compararon con los estándares establecidos por el Acuerdo Ministerial 097-A (A.M. 097-A), (Tabla 1[177] - Criterios de calidad de fuentes de agua para consumo humano y doméstico, Tabla 2 - Criterios de Calidad Admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y de estuarios, y 2a - Criterios de calidad admisible del amoniaco total para la protección de la vida acuática [mg/1 NH_3]) y Tabla 3 - Criterios de calidad de aguas para riego agrícola).

En la Tabla 13 se resumen algunos de los parámetros que se analizarán con más detalle.

Parámetro	Tabla 1	Tabla 2 y 2a	Tabla 3	OMS	EPA	U. EUROPEA
	Consumo humano	Preservación y conservación vida acuática	Riego agrícola	Efectos en la salud humana	Pueden dañar salud humana al consumirse	Consumo humano
pH					6.5 - 8.5	
Sulfatos	500	NA	250	500	250	
As	0,1	0,05	0,1	0,01	0,01	0,01
Cd	0,02	0,001	0,05	0,03	0,005	0,005
Co	NA	0,2	0,01			
Cr	0,05	0,032	0,1	0,05	0,1	0,05
Cu	2	0,005	0,2	2	1	
Fe	1	0,3	5			
Hg	0,006	0,0002	0,0	0,006	0,002	0,001
Mn	NA	0,1	0,2	0,4	0,05	
Mo	NA	NA	0,0	0,07		
Ni	NA	0,025	0,2	0,07		0,02
Pb	0,01	0,001	5	0,01		0,01
Se	0,01	0,001	0,0	0,01	0,05	0,01
Zn	NA	0,03	2	3	5	

Tabla 13. ESTÁNDARES DE LA NORMA ECUATORIANA E INTERNACIONALES PARA AGUA SUPERFICIAL EN MG/L
FUENTES: MIN. AMBIENTE ECUADOR (2015), OMS (2006), EPA (S.F.), U. EUROPEA (2015)

De acuerdo con la tabla anterior, los límites establecidos por el Ministerio de Ambiente de Ecuador se encuentran ajustados a estándares internacionales, con algunas excepciones. En el caso del cobre y mercurio, los estándares de EPA son más estrictos que la norma ecuatoriana, mientras que, para el zinc, manganeso, molibdeno y níquel, los valores establecidos por la OMS son más restrictivos que los que rigen en Ecuador.

Por su parte, **el límite permisible establecido tanto por OMS como EPA para arsénico es un orden de magnitud más estricto que el del MAE**. Vale la pena destacar que la normativa ecuatoriana no establece unos valores límite o rango para pH y conductividad eléctrica. Si bien estos son parámetros muy básicos, pueden considerarse como parámetros de diagnóstico temprano, es decir que, a partir de mediciones anómalas de estos, se puede identificar oportunamente cambios en la composición fisicoquímica de las aguas superficiales.

Como se ve, es también oportuno un llamado de atención a las autoridades ambientales y de salud ecuatorianas para ajustar sus normas a estándares internacionales con el fin de mejorar las condiciones ambientales y de salud pública.

[177] Los números de tabla citados en este aparte corresponden al consecutivo de la reglamentación.



La conductividad eléctrica es un parámetro fácil de medir en campo, es decir que se pueden obtener muchos datos en una sola jornada. Este parámetro al reflejar el contenido de especies conductoras en solución permite intuir si en el medio se han liberado sales y metales. Durante la jornada de campo realizada en junio de 2022, los profesionales de TERRAE midieron la conductividad eléctrica sobre diferentes cuerpos de agua dentro y alrededor del área de operación (Figura 76). De acuerdo con los valores medidos, la conductividad eléctrica en el área de estudio es muy baja, con un rango de 11 a 65 µS/cm, e incluso predominan los valores por debajo de los 50 µS/cm.

Este rango de valores bajos en conductividad eléctrica para las aguas superficiales se observó también en el páramo de Chingaza (La Calera, Colombia) donde las dinámicas geoquímicas entre los materiales geológicos y el agua permitían que esta tuviera conductividades menores a 100 µS/cm (Fierro, 2016[178]). En cuanto a los valores de pH medidos en campo, se observa una fuerte tendencia a la acidez, con valores de pH menores s a 6 principalmente al sur del área de operación en la quebrada Alumbre (Figura 77). Esto coincide con lo registrado en el EsIA, tal y como será expuesto más adelante.

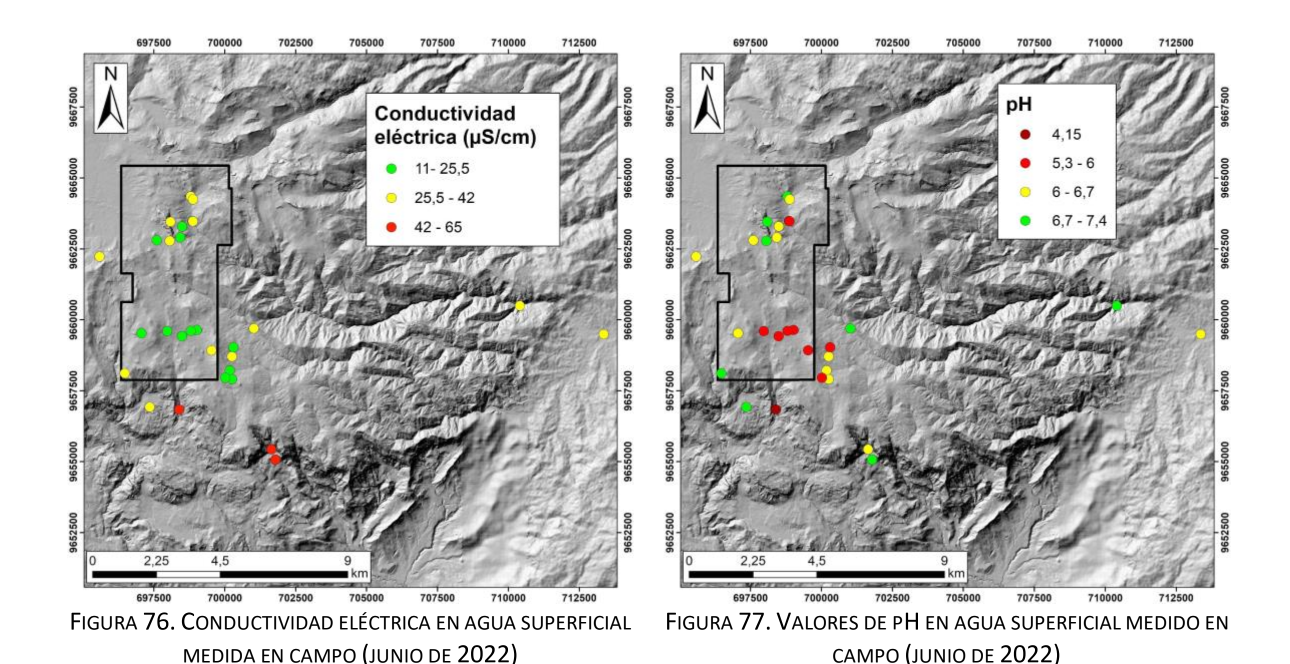


FIGURA 76. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN AGUA SUPERFICIAL MEDIDA EN CAMPO (JUNIO DE 2022)

FIGURA 77. VALORES DE PH EN AGUA SUPERFICIAL MEDIDO EN CAMPO (JUNIO DE 2022)

A continuación, se hará un análisis de los principales parámetros que fueron considerados en la caracterización de línea base de calidad de agua superficial. Para ellos es importante tener en cuenta con que estándares comparó la empresa los datos en cada uno de los puntos monitoreo. Respecto a eso, se menciona en el EsIA los siguiente:

> *"Todos los parámetros han sido analizados con dos CCA[179], según el Acuerdo Ministerial 097-A, Anexo 1, Tabla 1, Tabla 2, Tabla 2a y Tabla 3. Aquellos CCA descritos en la **Tabla 1** se*

[178] Fierro Morales, J. (2016). Caracterización geoambiental de la cuenca del río La Playa (páramo de Chingaza) y evaluación de la influencia del cambio climático en aspectos de calidad y cantidad de agua disponible para el geosistema – Fase I. Empresa de Acueducto de Bogotá.

[179] Control de calidad ambiental



*representarán con una línea roja punteada en las figuras, esta tabla se considera para el **punto MA3**, donde existe una captación de agua para consumo humano y abrevaderos de animales. Aquellos de la Tabla 2 se representarán con una línea roja continua, CCA para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y estuarios. Por último, aquellos parámetros de la Tabla 3 se representarán con una línea azul, este último límite se considerará para los puntos B1, B2, B3, MACCP, JOR, MAP, MAR y MA3, donde existe influencia en canales de riego y abrevaderos de animales, en el punto MA3."*

Se reitera que para la elaboración de este informe no se cuenta con los resultados de laboratorio originales, tan solo con los datos y el respectivo análisis para cada parámetro que hace la empresa minera en el EsIA. Esto quiere decir que el análisis que se hará a continuación se enfocará en la variabilidad espacial de los parámetros, más no temporal. **Al no contar con los datos de la línea base original, no es posible evaluar si se han dado cambios en las características fisicoquímicas a lo largo del tiempo, por ejemplo, en respuesta a las actividades de exploración del proyecto Loma Larga**.

En general, los parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro de las concentraciones de calidad ambiental establecidas por el MAE. En el caso del pH, la mayoría de los datos se encuentra en el rango de 6,5 a 9, con algunas excepciones cercanas a 6. La conductividad eléctrica se encuentra principalmente por debajo de los 100 µS/cm. Ambos parámetros son consistentes con lo medido por Terrae en junio de 2022.

Cabe resaltar que los valores de la cuenca de la quebrada Alumbre tienen una tendencia clara a la acidificación en dirección aguas abajo, con valores predominantemente menores a 4,5 (y mínimos de 3,5) en la estación MAP, lo cual está por debajo del CCA según la Tabla 2 del MAE, tal y como lo reconoce la empresa en su documento (Figura 78). Dicho comportamiento es consistente con la conductividad eléctrica, dado que la estación MAP presenta el mayor rango de variabilidad con valores incluso superiores a 200 µS/cm y el 50 % de los datos entre 50 y 100 µS/cm.

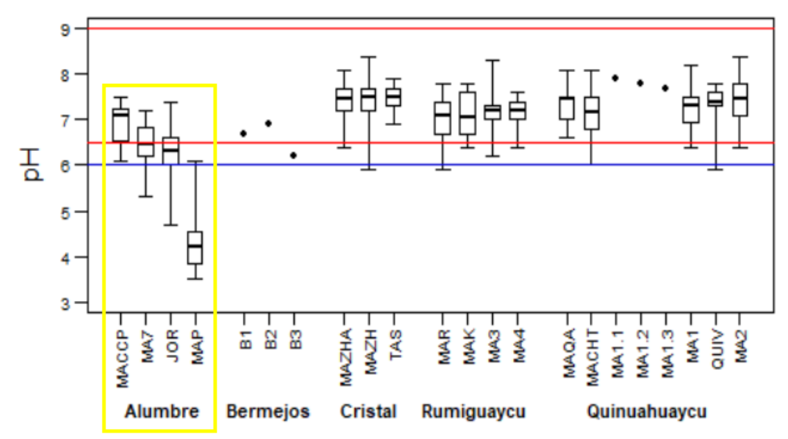


FIGURA 78. VALORES DE PH EN LA CUENCA ALUMBRE POR DEBAJO DEL CONTROL DE CALIDAD AMBIENTAL (CCA) DEL MINAMBIENTE (MAE), EL CUAL SE REPRESENTA CON LA LÍNEA AZUL)

FUENTE: MODIFICADO DE ESIA (INV METALS - CARDNO ENTRIX, 2021)



No obstante, debe tenerse en cuenta que la estación MACHT de la cuenca Quinuahuaycu, también muestra un amplio rango de valores de conductividad eléctrica, sin embargo, el 50% de los datos se encuentra restringido a aproximadamente 25 a 30 µS/cm. También, es posible considerar que esta variabilidad obedezca también al número de datos disponible para esta estación al ser la que mayor rango de tiempo de monitoreo tiene (10 años).

Con relación a los sulfatos, si bien los valores observados se encuentran por debajo de los estándares ecuatorianos e internacionales, se evidencia nuevamente un comportamiento anómalo en la cuenca de la quebrada Alumbre. La estación MAP presenta también los valores con mayor variabilidad y además los valores más altos, con el 50% entre 15 y 30 mg/l. La estación JOR, aguas arriba de la anterior, también se encuentra por encima del promedio, pero con valores predominantemente entre 4 y 8 mg/l. Adicional a estas estaciones, la estación MA3, de la cuenca de la quebrada Rumihuaycu, y estación QUIV, de la quebrada Quinuahuaycu, que a su vez se encuentran hacia la parte final de sus respectivas cuencas, presentan también valores más altos de la media.

Respecto al contenido de metales pesados y demás cationes, en el EsIA se hacen dos mediciones: una de cationes totales y otra de cationes disueltos. De acuerdo con el método que se siguió en el laboratorio (EPA 6020 A), para los totales tuvo que hacerse una digestión que disolviera todo el material que se encontrará en suspensión. Mientras que, para los disueltos, se filtraron las muestras en campo con una membrana de polipropileno de 0,45 µm. De acuerdo con los resultados obtenidos, la empresa afirma lo siguiente al inicio del análisis de **Cationes disueltos**:

> *"Luego de comparar las concentraciones de cationes disueltos y totales (Figura 6-158) se pudo determinar que no presentaron diferencias significativas (todas estas figuras fueron realizadas durante el período y en los monitoreos en los que se realizaron análisis, tanto de metales disueltos como totales) y, por lo tanto, las concentraciones de disueltos y totales se pueden tomar como iguales. (…) por lo que se puede tomar como válida para esta sección la descripción presentada en la sección anterior* (refiriéndose a cationes totales) *por tener mayor número de muestras tomadas"* (subrayado fuera de texto)

Relacionado con esta decisión, debe aclararse que se desconoce el número de muestras de agua filtrada que se tomaron para la medición metales disueltos, ya que en la tabla 6.112 que muestra el resumen de los resultados de laboratorio, los cationes se muestran de manera general, sin distinguir entre totales y disueltos. Ahora, el problema con esta interpretación de similitud cationes totales y disueltos es la conclusión a la que llegan respecto a los sedimentos:

> *"Esto último hace que los cationes totales sean todos los cationes disueltos que existen en el agua de los ríos de la zona, lo cual concuerda con las mediciones de sólidos en suspensión producto de este estudio. Adicionalmente esto muestra que no es necesario una caracterización de la calidad de los sedimentos debido a su baja presencia"* (subrayado fuera de texto)

De acuerdo con lo anterior, se está subestimando la eventual concentración de metales en la matriz sólida de sedimentos por procesos principalmente de adsorción y precipitación. Una cosa es que haya pocos sedimentos flotando en el agua y otra que los metales estén acumulados en el sedimento activo de las corrientes de agua. Esta la posibilidad de que los sedimentos tengan una alta concentración de estos cationes, pero las condiciones fisicoquímicas actuales del agua no



permiten que se liberen, pero siguen siendo un riesgo potencial. Por ejemplo, si las condiciones de pH y Eh del área llegan cambiar por las actividades del proyecto Loma Larga, y se vuelven más ácidas y oxidantes como cualquier zona minera, sería de gran importancia conocer las concentraciones de metales y demás cationes en sedimentos ya que bajo estas condiciones se facilita su liberación y movilidad en el medio.

En cuanto a los resultados para cada catión, lo primero para tener en cuenta es la eficiencia de los límites de cuantificación para cada elemento. En el caso del cobre (uno de los elementos más abundantes en este tipo de yacimientos), mercurio y selenio se tiene que algunos de los límites de cuantificación reportados se encuentran muy por encima de los valores permisibles definidos por el MAE. Esto no permite identificar valores que puedan representar un riesgo para el ser humano o los ecosistemas de manera oportuna.

La cuenca de la quebrada Alumbre sigue siendo la que presenta valores más altos. La estación MAP presenta valores por encima de los estándares del MAE e internacionales para arsénico, cadmio, hierro, manganeso, níquel, plomo y zinc (Figura 79).

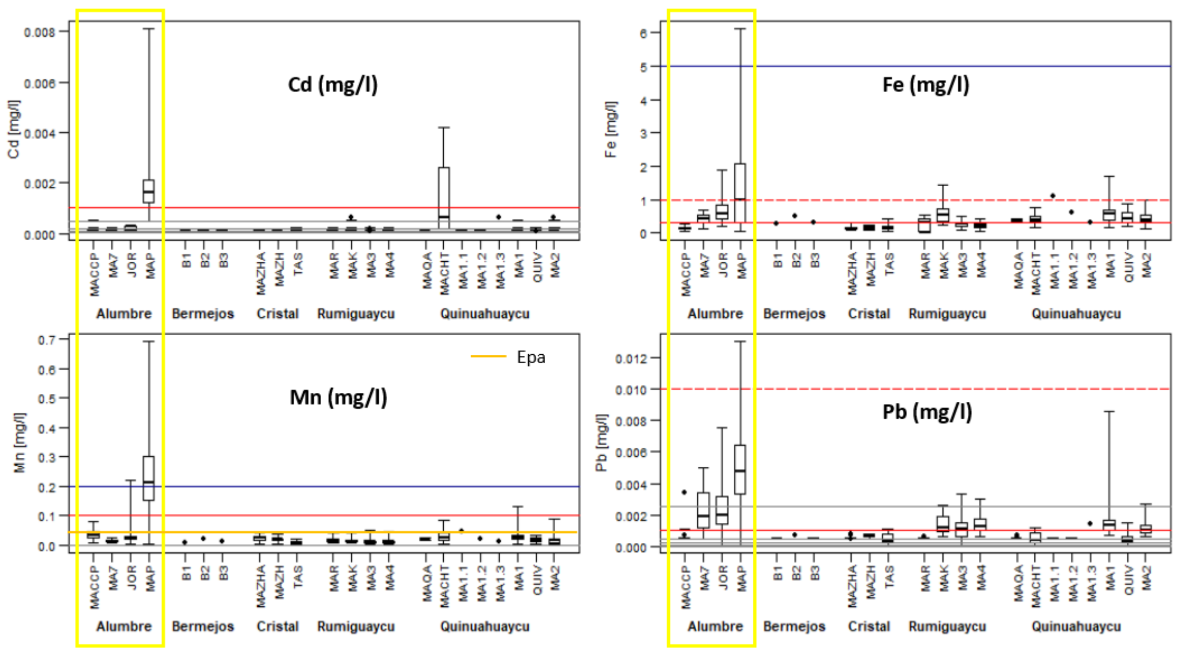


FIGURA 79. CONCENTRACIONES DE METALES EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA ALUMBRE QUE EXCEDEN LOS VALORES DEL CONTROL DE CALIDAD AMBIENTAL (CCA) DEL MINAMBIENTE (MAE).

FUENTE: MODIFICADO DE ESIA (INV METALS - CARDNO ENTRIX, 2021)

Respecto al arsénico particularmente se tiene que en la estación MAP las concentraciones totales significativamente más altas que las disueltas (0,002 - 0,066 y 0,0005 – 0,025, respectivamente). Es decir que el aporte de arsénico al medio a través de material suspendido es alto. Sin embargo, la justificación de la empresa a esto es:

> *"MAP, como se explicó antes, está en otro ecosistema (bosque montano), presenta pendientes mayores y tiene rocas expuestas producto de un deslizamiento aguas arriba"*



Por un lado, esta justificación alerta sobre la exposición de rocas con contenido de arsénico a los procesos que ocurren en la superficie, pues la minería expone una masa de rocas inconmensurablemente mayor a la atmósfera que un deslizamiento, por otra, dicha justificación desconoce que las estaciones JOR y MA7 presentan también valores por encima de la media en el área de estudio, que, si bien no son de la magnitud de los valores de MAP, puede deberse únicamente a que se encuentran aguas arriba.

MAP estaría mostrando la acumulación de los procesos de transporte y movilización de contaminantes en la cuenca y que las estaciones aguas arribas muestran estos procesos parcialmente. Además, si bien en el documento se menciona que, aunque la estación presenta valores de arsénico más altos que las demás estaciones, sigue estando por debajo de los límites establecidos por el MAE. Sin embargo, al comparar con el límite establecido por OMS y EPA (0,01 mg/l) se tiene que más del 75 % de datos de concentración total en MAP sobrepasan dicho límite, mientras que en los disueltos es alrededor de 25 % y el valor promedio está muy cerca de dicho límite (Figura 80).

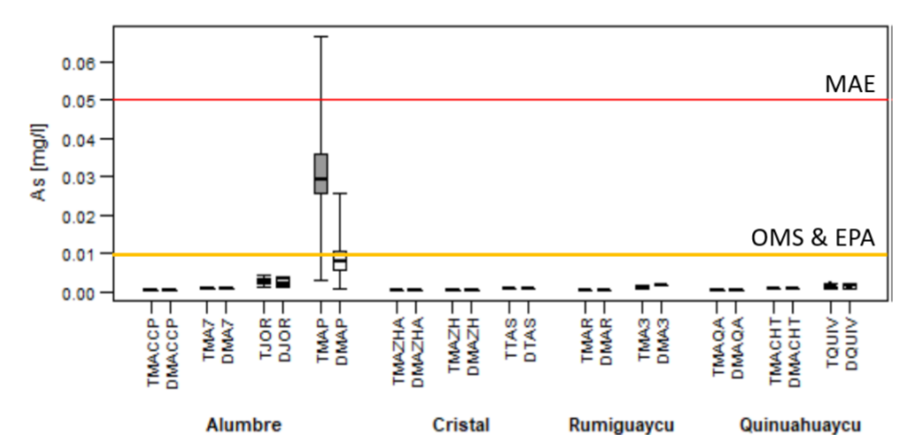


FIGURA 80. CONCENTRACIÓN TOTAL Y DISUELTOS DE ARSÉNICO COMPARADO CON NORMA ECUATORIANA Y ESTÁNDARES INTERNACIONALES

FUENTE: MODIFICADO DE EsIA (INV METALS - CARDNO ENTRIX, 2021)

De acuerdo con la información del EsIA, el proyecto Loma Larga pretende colocar el punto de descarga aguas arriba de la estación MCCP, es decir en la parte alta de la quebrada Alumbre. Surge entonces la pregunta de cuales podrían ser los efectos de adicionar una fuente de contaminantes en solución a un cuerpo de agua que ya se encuentra con valores por encima de la norma.

En términos generales, la mayoría de los datos de cationes totales y disueltos se encuentran por debajo de los valores establecidos por el MAE. No obstante, **se identificaron valores por encima de la norma en la cuenca del río Cristal (estación TAS) para cobre y níquel; en la cuenca de la quebrada Rumiguaycu para cobre (MAR, MAK, MA4), hierro (MAR, MAK), níquel (MA3) y plomo (MAK, MA3, MA4); y en la cuenca de la quebrada Quinuahuaycu para cobre (MA1, MA2), hierro (MA1, QUIV, MA2), níquel (MACHT) y plomo (MA1, QUIV, MA2)**. **El zinc se encuentra por encima del estándar en todas las estaciones de la red de monitoreo, similar al cobre que si bien no está excediendo en todas las estaciones si lo hace en por lo menos una de cada cuenca (Figura 81).**



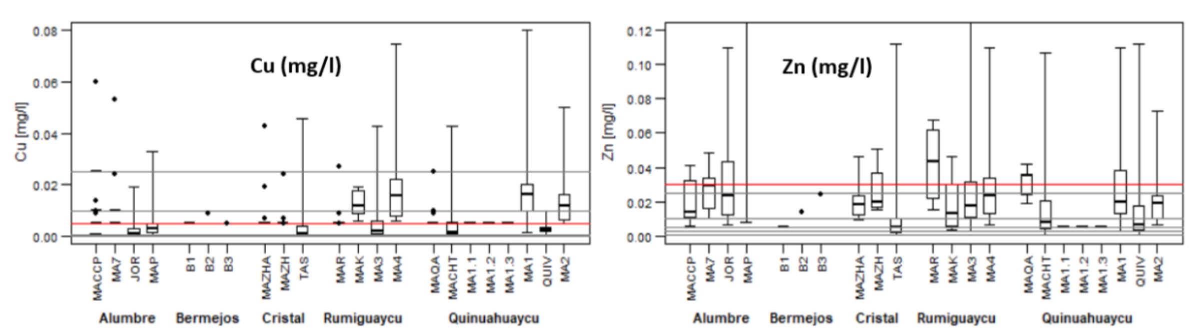


FIGURA 81. CONCENTRACIONES DE COBRE Y ZINC EN LAS CUENCAS DE ESTUDIO QUE EXCEDEN LOS VALORES DE CONTROL DE CALIDAD AMBIENTAL (CCA) DEL MINAMBIENTE (MAE).

FUENTE: MODIFICADO DE ESIA (INV METALS - CARDNO ENTRIX, 2021)

Por último, vale la pena resaltar que, aunque la cuenca de la quebrada Bermejos no presenta valores por encima de la norma, para este EsIA se cuenta únicamente con una toma de muestras para cada una de las estaciones dentro de esta cuenca. Se debe insistir en la importancia de la caracterización de esta cuenca desde la perspectiva temporal, dada la cercanía con la que se pretende sea el área de operación del proyecto minero.

3.2.3.3 Agua subterránea

Con el propósito de caracterizar la calidad química del agua subterránea en el área de estudio, la empresa minera utilizó seis piezómetros tradicionales para muestrear parámetros de calidad de agua a los alrededores del proyecto minero (Figura 82). De acuerdo con las características de los piezómetros, se tiene que los piezómetros LLDHG- 009A, LLDHG-009B, LLDHG-0010A, LLDHG-010B son capaces de monitorear los parámetros de calidad del agua de línea base y actividades operacionales asociadas con aguas subterráneas poco profundas, mientras que LLDHG-003C y LDGT-006 se pueden utilizar para monitorear las condiciones de calidad del agua subterránea de la roca profunda.

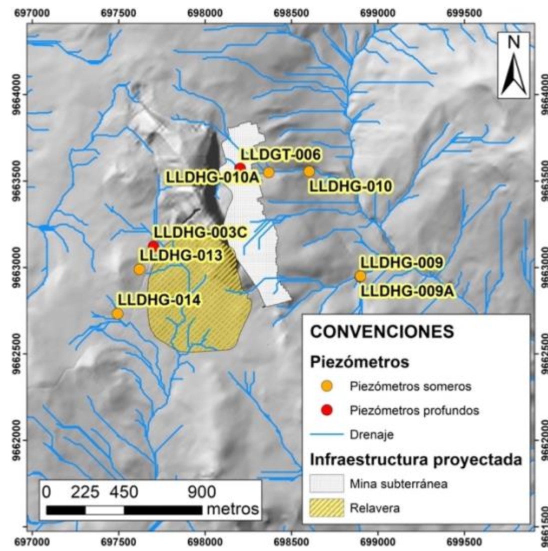


FIGURA 82. PIEZÓMETROS UTILIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE CALIDAD QUÍMICA DE AGUA SUBTERRÁNEA.

FUENTE: ELABORADO A PARTIR DE ESIA (INV METALS - CARDNO ENTRIX, 2021)



De acuerdo con la figura anterior, los puntos de muestreo utilizados para la caracterización del agua subterránea se encuentran restringidos espacialmente al área alrededor del yacimiento mineral y en lo que respecta a la relavera, aguas arriba de donde se daría la contaminación. Es decir que **se cuenta únicamente con información de línea base de una limitada porción de los acuíferos presentes en el área de estudio**. Además, desde la perspectiva temporal, **se cuenta únicamente con cuatro mediciones repartidas en tres años de monitoreo (2017 a 2019)**. Debido a esto, **es difícil hacer un análisis temporal de la información que permita identificar el comportamiento de los parámetros a lo largo del tiempo o su variación en función de variabilidad climática (época seca y época de lluvias). Esto genera una inmensa incertidumbre que impide tomar decisiones sustentadas respecto a la conveniencia de desarrollar la explotación minera**.

Tal y como se trató ampliamente en el capítulo de hidrogeología del presente informe, el planteamiento del área de estudio de agua subterránea es muy restringido y no obedece a límites naturales de cuencas hidrogeológicas. Partiendo de esto, se puede afirmar **que la caracterización de línea base para la calidad química del agua subterránea es insuficiente dado que no se tiene información de acuíferos que se encuentras más allá de un kilómetro a la redonda del yacimiento minero. Las consecuencias de esta omisión se centran en la no identificación oportuna de impactos a las fuentes de agua subterránea, y por consiguiente la generación de pasivos ambientales dada la complejidad de recuperar este tipo de aguas**.

Dadas las características del yacimiento mineral en el área de Quimsacocha, y los posibles problemas ambientales planteados en el marco teórico de este capítulo, el análisis del presente informe se centra en los parámetros que pueden incidir en la disponibilidad y movilización de arsénico en el agua subterránea. Además, teniendo en cuenta los cambios hidrogeoquímicos que se darían por la oxidación de minerales de sulfuro que hay en el subsuelo (en rocas y suelos) por el descenso del nivel freático y que permite la liberación al ambiente de metales pesados y arsénico.

En términos generales, el pH del agua subterránea en el área de estudia es predominantemente neutra a ligeramente ácida, con un rango de 5 a 7,8. No se observa una diferencia marcada entre las aguas subterráneas someras y las profundas, sin embargo, el piezómetro LLDHG-0010A presenta a lo largo de los tres años de monitoreo un pH constantemente ácido, alcanzando un valor de 5 en abril de 2019. El nivel freático en este piezómetro se encuentra a menos de un metro de profundidad por lo que dichos valores de pH pueden estar relacionados con la naturaleza de los suelos del páramo, que tienen un alto contenido de ácidos húmicos lo cual aporta acidez al medio. Se reitera entonces que estos ambientes ácidos son propicios para la liberación de especies químicas como metales pesados, que se encuentras adheridos o precipitados en compuestos o minerales inestables en las condiciones de superficie (pueden ser estables en el subsuelo, a profundidades donde permanentemente se está por debajo del nivel freático, en condiciones reductoras). Estos valores coinciden con las mediciones de pH que se hicieron a diferentes manantiales en junio de 2022 por Terrae, donde aquellos asociados al páramo se encontraban principalmente entre 4,1 y 6,3, y los asociados a roca entre 6,3 y 7,2 (Figura 83).

Los valores de conductividad eléctrica se encuentran en un rango muy por encima de los encontrados en el agua superficial, sin embargo, esto es una característica común en aguas subterráneas debido al enriquecimiento de iones en solución por el paso de estas por el subsuelo y la consiguiente interacción de las aguas con los minerales de las rocas.



El rango de valores está de 82 a 197 µS/cm, con valores anómalamente bajos en el piezómetro LLDHG-0010A (11 a 15 µS/cm). Esto es contradictorio a lo que se esperaría con los valores de pH ácido que fueron mencionados previamente. No obstante, puede esperarse que la acidez del agua en este punto permita tener en solución especies no conductoras por lo que no se ven reflejadas en el valor de conductividad eléctrica.

Respecto a los valores medidos en campo (Figura 84), estos se encuentran asociados principalmente al rango más bajo de los reportados en el EsIA, inferiores a 100 µS/cm. Los valores más bajos se encuentran en los manantiales asociados al páramo (menor a 42 µS/cm).

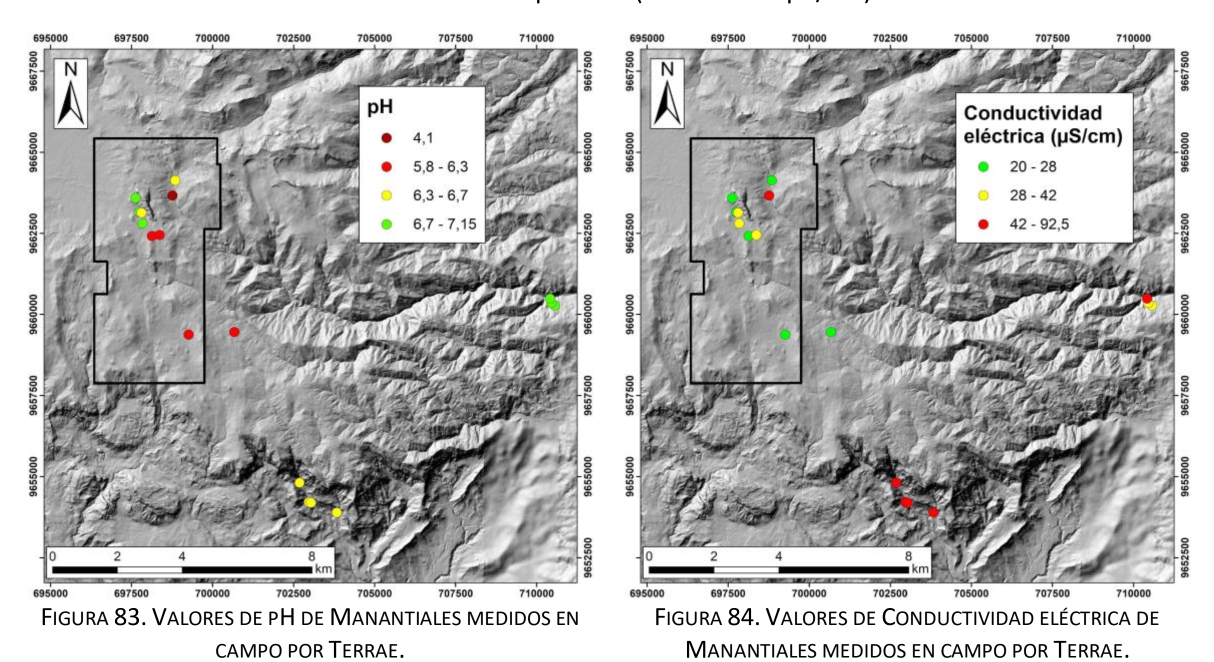


FIGURA 83. VALORES DE PH DE MANANTIALES MEDIDOS EN CAMPO POR TERRAE.

FIGURA 84. VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE MANANTIALES MEDIDOS EN CAMPO POR TERRAE.

De acuerdo con el análisis de caracterización hidrogeoquímica hecho en el capítulo de hidrogeología del presente informe, el agua subterránea alrededor del yacimiento está enriquecida en iones de sulfato y bicarbonato.

Los sulfatos se encuentran en un rango de 0,1 a 20 mg/l, con los valores más bajos en el piezómetro de agua somera LLDHG-0010A (0,1 – 0,3 mg/l), y los más altos en los dos piezómetros de aguas profundas (18 -25 mg/l, con un dato anómalo de 150 mg/l en LLDGT0-003C en 2018. Como se mencionó previamente, la probable fuente de sulfatos en el agua es la oxidación de sulfuros presentes en las rocas del área de estudia, que en la primera reacción libera hierro ferroso al medio y sulfatos.

En cuanto al bicarbonato, se mencionó ya que conforme a la secuencia Chebotarev en rocas ígneas, la evolución química normal es que aumente el pH y el bicarbonato. Esto quiere decir que se espera que este ion sea predominante en el agua subterránea del área de estudio. En el marco teórico de este capítulo se ahondó en el efecto del bicarbonato en el proceso de desorción (liberación) de arsénico de oxi-hidróxidos de hierro, quienes a su vez son los compuestos con mayor potencial de adsorción de cationes.



Con base en esto se podría decir que, a pesar del carácter reductor de las aguas subterráneas, **la liberación de arsénico es también un problema en este escenario no por oxidación de sulfuros sino por intercambio catiónico del ion bicarbonato y las especies arsenicales adheridas a estos minerales**. Por ahora, los valores de carbonato medidos en el agua subterránea se encuentran principalmente entre 34 y 107 mg/l, con valores anómalos menores al límite de cuantificación (6 mg/l) en el piezómetro LLDHG-0010A.

Como se ha recalcado a lo largo de todo el capítulo, el arsénico es el principal problema ambiental alrededor de la posible ejecución del proyecto Loma Larga. Si bien por sus propiedades fisicoquímicas, el arsénico puede estar en solución tanto a pH ácido como alcalino, es importante controlar la concentración en la que se encuentra por los efectos en la salud humana que puede llegar a tener.

Los valores de concentración de arsénico medidos en agua subterránea los tres años de monitoreo varían entre ellos significativamente. En el 2017 se encuentran entre los 0,0009 y 0,044 mg/l, estando **por encima de lo recomendado por OMS** (0,01 mg/l) en LLDHG0-009A, LLDHG0-010A y en los dos piezómetros de agua profunda. En el 2018 todas las mediciones se encuentran por debajo del límite de cuantificación (0,0005 y 0,001 mg/l). En el 2019 el escenario es preocupante dado que las concentraciones están entre 0,24 y 3,9, excediendo hasta en tres órdenes de magnitud los estándares internacionales. Inexplicablemente, la concentración de arsénico en LLDHG0-010A pasó de ser la segunda más alta de 2017 a la más baja en el 2019, pero igual sigue excediendo los límites, incluso laxos del MAE. **Dado que la ventana de tiempo es muy corta, resulta aventurado afirmar que la tendencia es al incremento de la concentración de arsénico con el tiempo, sin embargo, es evidente que del 2017 al 2019 se experimenta un aumento en cada uno de los puntos de monitoreo**.

Con el cobre sucede algo similar, además de exceder los valores recomendados tanto por MAE como por OMS y EPA. Mientras que en el 2017 los valores de concentración se encuentran entre 0,01 y 0,05 mg/l (excepto LLDHG0-009 y LLDHG0-006, donde no es detectable), en 2018 se encuentra entre 5,9 y 13 (excepto LLDHG0-010A donde es no detectable) y en 2019 está por debajo del límite cuantificable (0,0001 mg/l) para todos los puntos de monitoreo. Nuevamente, el piezómetro LLDHG0-010A pasa de ser el segundo valor más alto al más bajo (indetectable) de un año a otro.

Por último, información sobre contenido de otros metales como níquel, plomo y zinc, que se identificaron con algunos valores por encima de la norma en aguas superficiales, solo están disponibles para el año 2017. Para este año ya **se registraban concentraciones por encima de lo establecido por el MAE para plomo y zinc en el piezómetro LLDHG0-010A y de plomo en LLDHG0-009A y LLDHG0-003**. **Lamentablemente, al no disponer de más información respecto a estos, es imposible identificar si estos problemas son persistentes o puntuales. Este es un claro ejemplo de la incertidumbre que genera una línea base incompleta** al momento de caracterizar el medio que se va a intervenir y poder predecir los impactos que pueden llegar a generarse.

Si bien las concentraciones de elementos tóxicos en las aguas superficiales por ahora se encuentran superando levemente las normas en un escenario de intervención humana sobre el subsuelo que es baja, la minería liberaría una gran cantidad de dichos elementos al agua, al aire y al suelo y subsuelo. Por esta razón, la información sobre existencia de estos elementos en la naturaleza debe llevar a una decisión que asegure el suministro de agua para las personas y los ecosistemas con una calidad



que permita los procesos vitales en el marco del goce de los derechos colectivos al ambiente sano y a los derechos fundamentales a la vida.

3.3 Conclusiones

El impacto a la calidad química del agua superficial y subterránea es uno de los principales problemas que acarrea el desarrollo de un proyecto de minería de metálicos. Además, un ecosistema vulnerable y de gran importancia en cuanto a servicios ecosistémicos hacen que el riesgo ambiental aumente significativamente.

Los yacimientos minerales de alta sulfuración tienen altas concentraciones de sulfuros metálicos que, durante labores de exploración y explotación, donde se perturba el subsuelo dejando expuesto a la intemperie rocas y suelos, se oxidan y desencadenan una serie de reacciones geoquímicas que incluye acidificación del medio y aporte de metales en solución y sulfatos al agua. En el caso particular del proyecto Loma Larga, la presencia de sulfuros de arsénico como la enargita, luzonita, tennantita y tetraedrita hacen que la liberación del metaloide bajo ciertas condiciones de pH y Eh, sea un riesgo ambiental bastante alto.

La caracterización de línea base ambiental para la calidad del agua superficial y subterránea presenta varias irregularidades desde la perspectiva espacial y temporal. Para el agua superficial, a pesar de requerirse por lo menos 12 años de monitoreo, la empresa minera cuenta con 23 estaciones, únicamente en quebradas y ríos, donde no hay una medición periódica y constante. Tanto así que una de las cuencas más cercanas a la que sería la zona de operación, Bermejos, tiene un solo dato para representar "12 años de monitoreo". Para el agua subterránea, se planteó un área de estudio restringida a aproximadamente un kilómetro a la redonda del yacimiento minero, omitiendo cualquier tipo de limite natural que puedan tener los acuíferos en el área a intervenir. Además, se cuenta únicamente con información para tres años (algunos parámetros incluso solo tienen en un año), lo que impide hacer un análisis riguroso del comportamiento de las características fisicoquímicas del agua a lo largo del tiempo.

De acuerdo con los valores reportados por la minera, en la cuenca de la quebrada Cristal, donde se pretende ubicar el punto de descarga, se evidencia ya concentraciones anómalas, superiores a los límites establecidos por MAE y organizaciones internacionales, de arsénico, cadmio, manganeso, níquel y zinc. En las cuencas Quinuahuaycu y Rumiguaycu se identificaron valores por encima del límite de MAE en las estaciones más aguas abajo de cada una, al igual que zinc y níquel. Por su parte, en el agua subterránea se detectan concentraciones de arsénico por encima de la norma en piezómetros de aguas someras y profundas, al igual que con cobre, níquel, plomo y zinc.

Es evidente que en el área del páramo de Quimsacocha se desarrollan de manera natural una serie de reacciones geoquímicas que ponen a disposición del medio elementos de riesgo ambiental como el arsénico y metales pesados. Sin embargo, la idea de llevar a cabo en esa área una actividad de la magnitud del proyecto Loma Larga se puede catalogar de irresponsable, más aún con la claridad del desconocimiento del área por parte de la empresa. Intervenir esta área con actividades propias de la minería de metálicos solo intensificarían y acelerarían procesos que se dan de manera natural en el páramo, agravando así las condiciones que en este informe se describen.

Transversal 15B No. 46 – 16 Of. 506 Tel: 340 24 62 Bogotá D.C., Colombia
info@terraegeoambiental.org



4. DEPÓSITO DE RELAVES

Dentro del proceso de explotación minera de elementos metálicos se generan residuos sólidos que se denominan relaves y que corresponden a una suspensión de sólidos en líquido, constituidos fundamentalmente por el mismo material presente en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso.

Dependiendo del tipo de minería, los relaves pueden ser líquidos, sólidos o lodo compuesto de partículas finas. Muchas sustancias que se encuentran en los relaves son tóxicas, e incluso radioactivas, y frecuentemente los relaves contienen grandes cantidades de cianuro, mercurio y arsénico. Los relaves son materiales que difieren considerablemente de los suelos naturales en cuanto a sus propiedades índice, por ejemplo, gravedad específica normalmente mayor que 3.0 (Dimitrova & Yanful, 2012)[180] y susceptibilidad a lixiviación y drenaje ácido o alcalino (Robertson & Kirsten, 1989)[181]. Estos materiales suelen tener una clasificación geotécnica de limos de baja plasticidad según el sistema de unificado de clasificación suelos, lo cual representa un comportamiento intermedio entre las arenas y las arcillas. Los limos han sido menos estudiados al ser comparados con las arenas y las arcillas, ya que no presentan las ventajas que tienen unos y otros como material de construcción o como barreras aislantes respectivamente.

En general, durante mucho tiempo era común en varios países la disposición de los relaves vertiéndolos directamente sobre cuerpos de agua, valles o incluso al mar (SERNAGEOMIN, 2007)[182]. Cuando estos sitios no eran accesibles, se solía acumular los relaves en áreas de contención con terraplenes levantados con los mismos relaves. Sin embargo, una vez se agotaba el yacimiento, estos depósitos eran abandonados. El desarrollo de esta tecnología tipo “presa de relaves” tuvo lugar sobre una base principalmente empírica y mayormente relacionada con las prácticas de construcción y equipo disponible en la época (Beltrán-Rodríguez, Larrahondo, & Cobos, 2018)[183].

Estas presas son estructuras de contención para los relaves que son construidas con los mismos residuos del proceso metalúrgico o con otro material de préstamo e inclusive con la roca estéril del proceso de extracción del mineral (Rodríguez & Oldecop, 2011)[184]. En general, se inicia con un muro inicial y se van construyendo diques perimetrales que crecen en altura al ritmo de producción del proceso extractivo.

Actualmente existen distintos tipos de tecnologías de disposición de relaves mineros, los cuales suelen seleccionados en función de la topografía, la tasa de producción y del clima. La forma convencional de disposición de relaves contempla la construcción de presas y estructuras de contención en las que se acumulan los relaves durante la operación de los proyectos mineros. En los últimos años se han desarrollado técnicas alternativas de disposición de relaves, como los son el espesamiento, el filtrado, el retrollenado de minas, el realce de estructuras ya existentes y la

---

180 Dimitrova, R., & Yanful, E. (2012). Factors affecting the shear strength of mine tailings/clay mixtures with varying clay content and clay mineralogy. Engineering Geology, 125, 11-25

181 Robertson , S., & Kirsten, I. (1989). Draft acid rock drainage technical guide Vol. 1. Vancouver.

182 SERNAGEOMIN. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. Santiago de Chile

183 Beltrán-Rodríguez, L., Larrahondo, J., & Cobos, D. (2018). Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, 44, 5-20

184 Rodríguez, R., & Oldecop, L. (2011). Humedad y estabilidad geotécnica de presas de relaves. Aspectos relacionados a la hidrogeología e hidroquímica en zonas mineras del sur del Ecuador. Quito., (pág. 45). Quito.



disposición submarina (Beltrán-Rodríguez et al., 2018; Fourie, 2015[185]) con problemas ambientales asociados en todos los casos (Kwong *et al*, 2019[186]; Maqbool *et al*, 2013[187]).

4.1 Tipos de depósitos de relaves

Existen varios tipos de depósitos de relaves los cuales dependen directamente de la proporción de fase sólida y fase líquida de los relaves a almacenar, correspondiendo a relaves convencionales, espesados, filtrados y en pasta, a partir de esta clasificación se disponen generalmente en presas o en depósitos. No existen relaves "secos" como sesgadamente se ha utilizado el proyecto Loma Larga en el EsIA.

4.1.1 Presa de relave:

Depósito donde el muro es construido con la fracción más gruesa del relave, compactado, proveniente de un hidrociclón (operación que separa sólidos gruesos de sólidos más finos, mediante impulsión por flujo de agua). La parte fina, denominada lama, se deposita en la cubeta del depósito. En las presas se disponen relaves (colas) convencionales con una fase sólida entre el 20 y 40% y espesados entre el 60% y 65% (Minenergía & ATG, 2021)[188].

4.1.2 Relave espesado:

Depósitos en el que la superficie es previamente sometida a un proceso de sedimentación, en equipo denominado Espesador, que favorece la sedimentación de los sólidos (de manera similar a la limpieza de agua de ríos para hacer agua potable), con el objetivo de retirar parte importante del agua contenida, la que puede ser re-utilizada para reducir el consumo hídrico de fuentes de agua limpia. El depósito de relave espesado se construye de forma tal que impida que el relave fluya a otras áreas distintas a las del sitio autorizado, y contar con un sistema de piscinas de recuperación de agua remanente que pudiese fluir fuera del depósito (SERNAGEOMIN, 2007)[189].

4.1.3 Relave filtrado:

Este tipo de depósitos de relaves es muy similar al de los relaves espesados, con la diferencia de que el material contiene menos agua debido al proceso de filtrado utilizando equipos similares a los que se emplean para filtrar concentrados, como son los filtros de prensa o de vacío. El relave una vez filtrado se transporta al lugar de depósito mediante cintas transportadoras o bien mediante equipos de movimiento de tierra y/o camiones (SERNAGEOMIN, 2007).

Es importante señalar que, en este método, aunque el contenido de agua que se logra (20 % a 30%) permite su manejo con equipos de movimiento de tierra, es suficientemente alto como para tener un relleno prácticamente saturado, por lo que es posible que se produzcan infiltraciones importantes de las aguas contenidas en estos relaves si el suelo de fundación es relativamente

[185] Fourie, A. (2015). No more tailings dams! Are these realistic alternatives?. Tailings 2015. Santiago de Chile.

[186] Kwong, Y.T.J., Apte, S.C., Asmund, G. (2019). Comparison of Environmental impacts of Deep-sea Tailings Palcement Versus On-Land Disposal. Water Air Soil Pollut, pp 230-287. https://doi.org/10.1007/s11270-019-4336-1.

[187] Maqbool, S., Bhat, S.J.A., Hanifa, S., Sul, S., Ahmad, N., Qazi, G., Wani, S. (2013). Minings and its impacts on environment with special reference to India. International Journal of Current Researsh, Vol 5, Issue 12, pp. 3586-3590.

[188] Minenergía & ATG. (2021). Propuesta de Lineamientos Técnicos para Estandarizar los procesos relacionados con Presas de Relaves. Bogotá.

[189] Ibid.



permeable. También es necesario señalar que la presencia de algunas arcillas, yeso, etc. en los materiales de relaves pueden reducir significativamente la eficiencia de filtrado (SERNAGEOMIN, 2007). Según expertos:

> *"La tecnología aún no está lista para desplegar con éxito los relaves filtrados en una operación a gran escala (…)"*. MINPER, 2019[190]. (Entrevista con Anglo American Quellaveco).

En lo referente a la tecnología de los relaves filtrados y en general las técnicas de disposición alternativas de relaves se ven favorecidas en climas secos (Watson, 2017[191]). En particular, los relaves filtrados compactados *"tienen limitaciones operativas de aplicación durante los periodos de moderada a alta precipitación"* (Golder, 2013[192]) y de moderada a alta sismicidad, especialmente en zonas con precipitación total mensual de 50 mm en adelante, siendo esta tecnología una posibilidad donde el clima lo permita (MINPER, 2019). En climas húmedos, la pluviosidad y evaporación del sitio, el tiempo y área de desecación y la flexibilidad operacional pueden limitar la aplicación del filtrado de relave (Beltrán-Rodríguez, Larrahondo, & Cobos, 2018) [193] ya que **los relaves filtrados pueden alcanzar nuevamente su condición de saturación total debido a procesos de infiltración** (KCB, 2017), modificando el comportamiento mecánico esperado de los materiales. Adicionalmente, los problemas de contaminación de agua y aire son aspectos a considerar de forma paralela a los análisis de estabilidad geotécnica.

Respecto al proceso de filtrado, se debe tener presente que este puede no ser aplicable para todos los tipos de relaves y en todos los tipos de situaciones, dependiendo incluso del material que se obtiene en el proceso de trituración (KCB, 2017).

Es importante destacar que no existen relaves secos, ya que todos los tipos de relaves tienen algún porcentaje de agua, el cuál dependerá de la alternativa de disposición seleccionada. No se debe, en ningún momento, establecer que los relaves serán "secos" y las consideraciones sobre su estabilidad e impactos a corto, mediano y largo plazo deben tener en cuenta esta particularidad, sin que las autoridades competentes menosprecien las posibles afectaciones que se podrían presentar. Adicionalmente, los proyectos que involucren este tipo de relaves deben considerar que no existen precedentes del comportamiento de estos relaves a gran escala (KCB, 2017)[194], lo que genera incertidumbre en el funcionamiento a largo plazo de estos depósitos. Usar la expresión relaves secos, como lo han hecho las empresas mineras en distintos proyectos, es inadecuado, sesgado y conceptualmente peligroso, pues considerar la disposición de un sólido seco lleva a omitir el hecho de que estos materiales pueden saturarse y fluir.

---

[190] MINPER. (2019). Guía oficial de inversiones de PERUMIN. Global Business Reports.

[191] Watson, A. (2017). La disposición alternativa de relaves - ¿Es la "fórmula mágica para el manejo de residuos mineros?. Noricias Stantec, Perú. Recuperado el 10 de abril de 2020 de https://www.stantec.com/es/news/2017/alternative-tailings-disposal-magic-formula-mine-waste.

[192] Golder Associates (2013). Experiencias de Operación de Depósitos de Relaves Espesados y Filtrados. J. Lara, líder del grupo geotécnico-relaves.

[193] Ibid.

[194] Klohn Crippen Berger (2017). Study of tailings management technologies: Report to Mining Association of Canada and Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program, MEND Report 2.50.1



4.1.4 Relave en pasta

Corresponden a una mezcla de agua con sólido, que contiene abundantes partículas finas y bajo contenido de agua, de modo que la mezcla tenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad. Una buena pasta de relaves requiere tener al menos un 15% de concentración en peso de partículas de tamaño menor a 20 micrones (SERNAGEOMIN, 2007)[195].

4.1.5 Otros tipos:

Existen otros tipos de depósitos de relaves, como por ejemplo los depósitos en minas subterráneas, en tajos abandonados, entre otros.

4.2 Comportamiento mecánico de los relaves

Respecto al comportamiento mecánico de los relaves, así como del proceso constructivo, recomiendan caracterizaciones de los materiales que serán dispuestos, junto con un seguimiento al proceso constructivo que se implemente en el proyecto minero, de forma tal que se pueda verificar que se cumple con los lineamientos de diseño avalados por las agencias reguladoras. En lo relacionado con la estabilidad geotécnica, la compactación de los relaves filtrados debe seguir un procedimiento riguroso, debido a que es este proceso constructivo el que garantizará su estabilidad. El no cumplir con el valor estimado de densidad durante el proceso de compactación o el contar con materiales que no se encuentran en el contenido óptimo, puede implicar cambios volumétricos de expansión-colapso por humedecimiento a esfuerzo vertical constante. En caso de que no se alcancen las especificaciones de los relaves filtrados o del proceso constructivo, se incrementará la probabilidad de falla de los depósitos construidos.

No obstante, a pesar de consideraciones que mejoran la estabilidad (pero no la aseguran), se han presentado decenas de casos a lo largo y ancho del mundo de fallas de estas estructuras causantes de miles de muertes y de contaminación química del agua que llevan a cuestionar su utilización. Un enfoque preventivo de no permitir la disposición de relaves a cielo abierto, particularmente aguas arriba de poblaciones, ciudades o en cuencas abastecedoras de agua es lo más recomendable.

El contenido de agua óptimo cuando se realiza el proceso de compactación se encuentra cercano al contenido de agua de saturación de un material. Esto conlleva a que el material sea susceptible a la propagación de licuación (Ulrich, 2019). En el momento de la licuación, toda la acumulación puede colapsar y llevar al flujo de los materiales en comportamiento de líquido con una viscosidad que va a depender del contenido de agua. Esa posibilidad se analizó en detalle en el capítulo anterior.

Debido a que la reología del material se espera no sea plástica, su conductividad hidráulica es mayor que la de suelos cohesivos, permitiendo así el aumento en su saturación. El escenario crítico de análisis de este tipo de materiales suele corresponder con el aumento en las presiones de poros (de líquidos o de gases) ya sea por un proceso de carga estático o dinámico. Acelerar un proceso de carga (como la disposición de los relaves en la estructura de depósito) en este tipo de materiales antrópicos no consolidados contráctiles, junto con el agua de infiltración en los relaves puede detonar el proceso de licuación estática. De forma similar, procesos de carga dinámica como el movimiento de los vehículos de carga en el trayecto de la planta de filtrado al depósito de relaves,

[195] Ibid.



podría inducir la licuación de estos materiales, generando derrames no controlados al interior del proyecto minero (Golder, 2013).

4.3 Riesgos asociados a los depósitos de relaves

Las presas de relaves presentan un alto potencial de falla, debido al tipo de materiales que se utilizan y la forma de construcción, al ser por etapas, las hace más vulnerables a presentar algún tipo de falla (Xhen, Wei, Xu, & An, 2016)[196].

De acuerdo con ICOLD (2001)[197], entre 1970 hasta el año 2002 se habían presentado de 2 a 5 fallas de este tipo de estructuras anualmente, con un total de 221 casos de fallas o accidentes (Figura 85). En estos casos existen diversos casos de rotura; sin embargo, casi siempre la falla está asociada a un mal funcionamiento hidráulico, ya sea por error de operación, por falta de atención adecuada o por haber adoptado hipótesis de diseño equivocadas. En todos los casos, el resultado de esos fallos de PR es una rápida transferencia de la carga hidráulica a zonas inmediatamente vecinas a alguno de los taludes exteriores de la PR, con la consecuente pérdida de estabilidad, desarrollo de tubificación o directamente el sobrepaso de la presa (Rodríguez & Oldecop, 2011)[198].

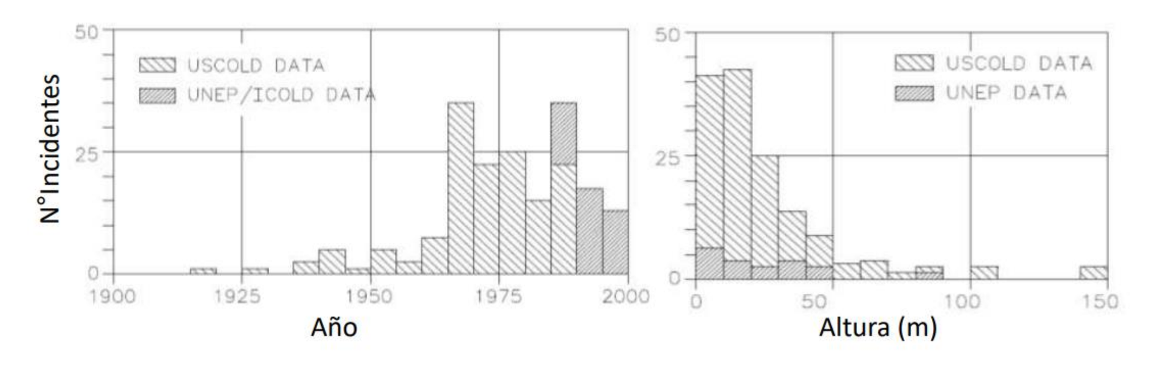


Figura 85. Estadísticas de falla en relaves
Fuente: Modificado de (ICOLD, 2001)

El evento más reciente conocido internacionalmente fue el colapso de la represa de la empresa minera Vale en Brumadinho, Brasil, el 25 de enero de 2019, en el que desaparecieron 300 personas. Además, también se tienen otros eventos conocidos como el ocurrido en Canadá, cuando falló la represa de la mina de cobre y oro Mount Polley en 2014, se derramaron 25 millones de metros cúbicos de aguas residuales y desechos en lagos y sistemas adyacentes de suministro de agua o la falla de la represa Samarco en Brasil, en el año 2015, donde se derramaron al medio ambiente 33 millones de metros cúbicos de residuos de mineral de hierro, ocasionando la muerte de 19 personas,

[196] Xhen, Z., Wei, Y., Xu, K., & An, H. (2016). Risk assessment of tailings dam break due to overtopping. EJGE, 21(07), 1641-1649.
[197] ICOLD. (2001). Tailings dams risk of dangerous ocurrences: lessons learnt from practical experiences, Bulletin 121. París.
[198] Ibid.



desplazando a 600 familias y contaminando las vías fluviales 620 kilómetros río abajo hasta llegar al mar (Industrial Global Union, 2019)[199].

Cuando se produce la falla de este tipo de presas se presenta un flujo de lodos o detritos que son altamente destructores y que pueden viajar grandes distancias antes de detenerse (Cuervo, Burge, Beaugrand, Hendershot, & Evans, 2017)[200]. Estas condiciones se han dado cuando ha ocurrido lo que se conoce como "falla de flujo" o "licuación estática" de los relaves, observando que en varios casos el ángulo de reposo del material depositado es extremadamente bajo, lo que es signo de que los relaves presentaban una baja resistencia al esfuerzo cortante (Rodríguez & Oldecop, 2011)[201], y lo que genera como factor común la alta saturación de humedad de los relaves en el momento de las fallas.

Los flujos generados por la falla de este tipo de estructuras afectan de manera significativa el ecosistema, la salud y generan pérdidas socioeconómicas debido a la rapidez con la que viaja el flujo aguas abajo y la contaminación a largo plazo que se presenta debido a las características de los lodos (Hatje, y otros, 2017)[202]. Por esta razón es importante en los análisis de falla, la modelación teniendo en cuenta flujos no newtonianos ya que, si la concentración de solidos mayor o igual que 55% la pulpa de relaves comienza a tener comportamiento de un lodo viscoso cuyo comportamiento de los esfuerzos cortantes no siguen una tendencia lineal (SERNAGEOMIN, 2007)[203], con el objetivo de determinar las posibles zonas aguas abajo de este tipo de estructuras que pueden verse afectadas en dado caso de materializarse el riesgo de falla.

Para el caso de relaves filtrados la estabilidad del depósito dependerá de los bajos contenidos de agua en su composición que debe tener cuando se compactan en terreno y cuando permanece en él de forma permanente ya que esta obra se contempla a perpetuidad y no tiene una obra de contención tipo presa. Como lo menciona Fierro (2019)[204] "*la estabilidad física de estos materiales está determinada principalmente por la cantidad de agua que contengan, de manera que a mayor cantidad de agua mayor es la posibilidad de que se comporten como fluidos. Si bien puede decirse que los relaves secos son más estables, los modelos de predicción son complejos y puede haber flujos en materiales con baja humedad*".

Dado lo anterior, mantener estas características de bajos contenidos de agua, está ligado fuertemente al comportamiento hidroclimatológico de la zona, por lo que en zonas lluviosas y húmedas puede no ser la alternativa más óptima a implementar, teniendo en cuenta que "*Los relaves acumulados en zonas lluviosas y húmedas representan el mayor peligro para poblaciones y ecosistemas cercanos debido a la constante humedad proveniente de las lluvias, pudiendo*

---

199 Industriall global union. (2019). Lo que se debe saber sobre las represas de relave. Obtenido de https://www.industriall-union.org/es/lo-que-se-debe-saber-sobre-las-represas-de-relave

200 Cuervo, V., Burge, L., Beaugrand, H., Hendershot, M., & Evans, S. (2017). Downstream Geomorphic Response of the 2014 Mount Polley Tailings Dam Failure, British Columbia. Fourth World landslide Forum, (págs. 281-289). Ljubljana.

201 Ibid.

202 Hatje, V., Pedreira, R., De Rezende, C., França , A., De Souza, G., Marin, D., & Hackspacher, P. (2017). The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. Scientific Reports, 7(1), 1-13.

203 Ibid.

204 Fierro, J. (11 de febrero de 2019). Los desechos de la minería y las presas de relave: una bomba de tiempo. Razon Pública. Obtenido de https://razonpublica.com/



eventualmente generar inestabilidad en el relave (licuefacción)" (Ministerio de Minería de Chile - MinMinería, 2019)[205].

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, y considerando el impacto que tiene en el medio ambiente la liberación de los materiales tóxicos contenidos en los relaves, no se considera conveniente construir depósitos de relaves. En particular, se debe tener en cuenta:

- Las relaveras o depósitos de relaves no tendrán ningún proceso de desmonte, lo cual implica que permanecerán en el territorio para siempre. Será la comunidad y el medio ambiente la que sufra las consecuencias de su falla, y no el proyecto minero ya que posiblemente no existirá ninguna representación de dicho proyecto que permita implementar planes de contingencia.
- Los proyectos mineros tienen un carácter temporal, mientras que las relaveras permanecen para siempre; esto implica forzosamente que no existirá mantenimiento preventivo o correctivo en estos depósitos y en la infraestructura adjunta que busca garantizar su bien funcionamiento.
- Siempre se debe tener presenta que el material que constituye el relave es un material heterogéneo de comportamiento mecánico complejo sobre el que todavía existen investigaciones en curso y del cual no se tiene certeza de su respuesta ante ciertas solicitaciones.
- No existe ningún tipo de relaves que se encuentre exento del riesgo de falla o colapso, siendo el caso más crítico aquel de falla por licuación estática o dinámica, tal como fue explicado en la sección anterior.
- La construcción de una relavera o de un relleno en general, modifica la geomorfología del sector, y con esos las condiciones del agua subterránea, propiciando el aumento del nivel freático y la saturación de los materiales del relleno.
- La construcción de la relavera está a cargo de quien explota el mineral y la requiere para obtener su beneficio, mientras que los riesgos asociados a la falla recaen en las comunidades aledañas y en el medio ambiente, quienes no se ven beneficiados del proceso de extracción realizado y quienes no pueden tomar decisiones reales y tangibles sobre dicho riesgo.

Por las consideraciones expuestas, la construcción de los depósitos de relaves representa un riesgo muy alto, en general no cuantificado de forma correcta o menospreciado por los EsIA presentados por las mineras.

4.4 Normativa internacional asociada a depósitos de relaves

A nivel mundial se han generado diversas normativas para el diseño, construcción y operación de los depósitos de relaves, a continuación, se presentan algunas de ellas (SERNAGEOMIN, 2018)[206].

En Perú se prohíbe la construcción de presas de relave con el método de aguas arriba y la disposición submarina o subacuática de desmontes y relaves, sólo se da autorización si no hay otra alternativa ambientalmente viable. En Chile, para construir y poner en marcha los depósitos de relaves se debe

---

[205] Ministerio de Minería de Chile - MinMinería. (2019). Bases para una política nacional de depósitos de relaves.

[206] SERNAGEOMIN. (2018). Estudios de normativas internacionales de diseño, construcción, operación, cierre y post cierre de dépositos de relaves. Santiago de Chile.



tener aprobación por parte del Servicio Nacional de Geología y Minería - Sernageomin. Adicionalmente, cuando los tanques de relave superan los cinco mil metros cúbicos necesitan de la aprobación de la Dirección General de Aguas, y el plan de cierre debe ser aprobado por Sernageomin.

La legislación mexicana en cuanto a relaves guarda cierta similitud con la chilena, en particular, la norma NOM-141, que establece el procedimiento para caracterizar los relaves y las especificaciones para la preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post operación. En Brasil, las empresas mineras deben presentar al Ministerio de Minas y Energía, un documento que incorpore toda la temática ambiental relevante del proyecto, esto está consagrado dentro de la constitución, en su artículo 225. Adicionalmente, se debe generar por parte de las empresas un “Plan de Aprovechamiento Económico” en donde se mencione las características de los minerales, los volúmenes de producción, las reservas y, además, un Plan de Recuperación del Área Degradada, que aprueba la Agencia de Protección Ambiental, el cual es un requisito para que se conceda la denominada Licencia Preliminar.

En Canadá desde la falla de Imperial Metals Corp. en el año 2014 en el estado de Columbia Británica, se decidió actualizar el Código de Salud, Seguridad y Reclamación para Minas y empezaron las auditorias de manera periódica en las relaveras de los proyectos mineros. Debe existir dentro de la mina un profesional que este registrado en un listado oficial que sea el encargado de verificar que se esté cumpliendo con todo lo reglamentado en cuanto a los depósitos de relaves y cualquier inconveniente debe ser reportado al inspector jefe de la mina. Cabe señalar que en este país no sólo debe cumplirse la normativa ambiental provincial sino también la federal.

En Australia, los productos de desechos mineros se tratan en los planes de gestión ambiental los cuales deben ser aprobados por entidades a nivel estatal y de otros gobiernos territoriales, y cuando el impacto puede ser considerado significativo a escala nacional debe ser aprobado bajo la regulación “Environment Protection and Biodiversity Conservation Act”, del año 1999. Al igual que todas las entidades y legislaciones anteriormente mencionadas, estas tienen como objetivo asegurase que los depósitos de relaves y en general de desechos mineros sean considerados como “seguros”, lo que puede significar que cumplan con una estabilidad física y química, en la etapa de operación y cierre del proyecto minero. Se tienen además algunas guías para el diseño de los depósitos de relaves como las elaboradas por el estado de Australia Occidental.

En el Reino Unido se da más relevancia al carbón caracterizado como su producto minero insignia. La Autoridad del Carbón, tiene un modelo de arrendamiento de minería subterránea, el cual implica que el arrendatario debe tener entre sus obligaciones regresar el sitio en las condiciones adecuadas, esto es similar para cualquier producto minero que se extraiga en el país. En Sudáfrica se tiene la Ley Nacional de Gestión Ambiental en donde se encuentra el Reglamento de Residuos Mineros vigente desde 2015, el que debe cumplirse en lo relacionado a los depósitos de relaves, donde se menciona tanto el establecimiento como la recuperación de las zonas de desechos mineros.

De acuerdo con lo dispuesto por SERNAGEOMIN (2018), se puede evidenciar que los países de Chile y México son los únicos que establecen parámetros de diseño y especificaciones concretas para la construcción y evaluación de la sismicidad y otros aspectos de interés dentro de su normativa. Para Chile la legislación está ligada a un organismo geológico-minero, y en México es de tipo ambiental y de recursos naturales.

Los demás países sólo presentan indicaciones en términos generales y se basan en guías que entregan recomendaciones específicas y técnicas. Las guías pueden ser elaboradas por entidades especializadas en estos temas en cada país o por organismos internacionales como la Comisión Internacional de Grandes Presas (International Commission on Large Dams – ICOLD). Es común ver en la mayoría de estos países, que al no tener un reglamente especifico que establezca requisitos para la construcción de depósitos de relaves, se creen comités de expertos o se tenga la figura de profesionales especializados en esta rama los cuales revisan los aspectos técnicos y verifican la viabilidad y seguridad de las obras propuestas por las mineras

4.5 Análisis de Estudio de impacto ambiental (EsIA) por falla en los depósitos de relaves

4.5.1 Ubicación de los relaves

El depósito de relaves se encuentra proyectado sobre suelos saturados debido a su ubicación en zona de drenajes naturales. Para ello, la minera espera interceptar los flujos subsuperficiales bajo la geomembrana de impermeabilización de la relavera. La existencia de estas zonas de saturación y la presencia de flujo subsuperficial puede estar relacionada con la disposición geomorfológica de dicho sitio al aumento de niveles freáticos y a la acumulación de agua; se debería evaluar la posibilidad de que la construcción de la presa para el depósito de relaves convierta a la ubicación de la relavera en una zona de potencial inundación.

Sin embargo, dado que el estudio fue realizado con cartografía base a escala 1:50000[207], no es posible determinar con precisión posibles zonas de acumulación de agua o aumento en los niveles freáticos, con sus posibles consecuencias en términos de estabilidad.

En el capítulo 1.4.7 del EIA se menciona que este depósito se ubicara "(…) *al inicio de una* ***pequeña cuenca hidrográfica en el Atlántico.*** *El sector escogido está dentro de la concesión minera Río Falso, y es adyacente a las instalaciones de la mina subterránea y la planta de procesamiento de mineral (aproximadamente a 500 m al sur)"* (página 1.38). A manera de observación, el término "pequeña" cuenca no es un dimensionamiento técnico adecuado para especificar o clasificar el tamaño de una cuenca y adicionalmente no se entiende por qué se dice que es en el Atlántico ya que Ecuador no posee costas sobre ese océano.

Por otra parte, se puede inferir, que su localización en la parte más alta de la cuenca amazónica[208] puede afectar nacederos de cuerpos de agua, lo que conlleva directamente a un deterioro en el ecosistema hídrico y por ende un impacto negativo para la comunidad aguas abajo del proyecto minero. Esto se evidencia en la figura 1-12 del EIA (página 1-34) donde se observa algunos cursos de agua con líneas azul claro que pasan en el área donde se ubicaría el depósito (Figura 86).

[207] Indicado en los mapas

[208] Incluso, es posible que la ubicación del proyecto minero en la divisoria de aguas genere contaminación en la cuenca que drena al Pacífico, a través de aguas subterráneas que puedan llegar a alimentar dicha cuenca, pues en el EsIA no se muestra cuál es la divisoria de aguas subterráneas.



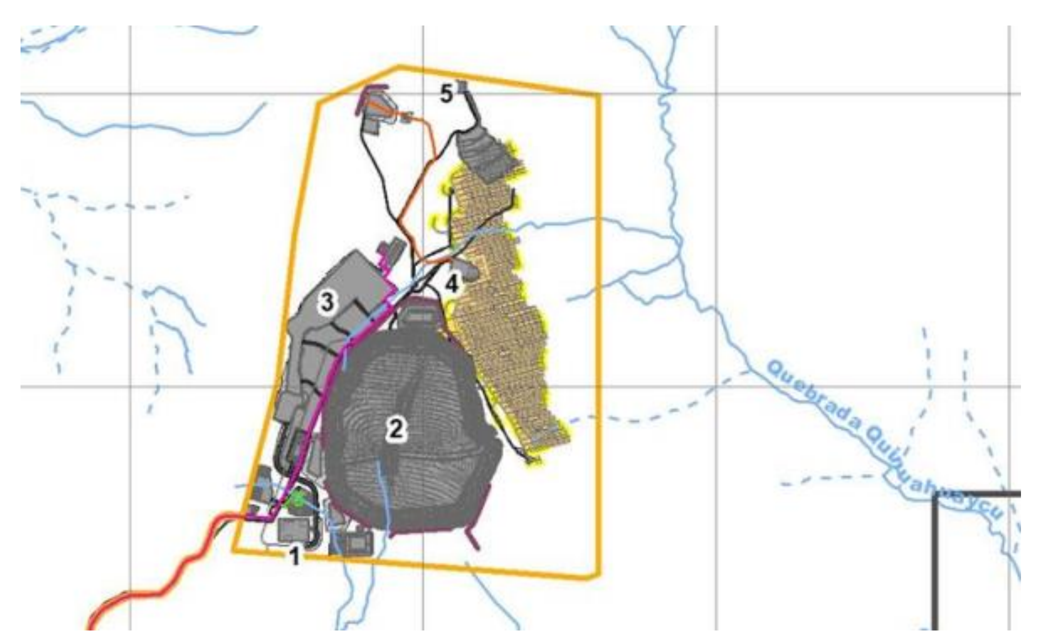


FIGURA 86. CURSOS DE AGUA SUPERFICIAL AFECTADOS POR EL PROYECTO LOMA LARGA. FUENTE: MODIFICADO DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021).

Al revisar el apartado de análisis de alternativas en cuanto a la ubicación se evidencia que la alternativa elegida se describe como un área "*…conservada con poca intervención,* ***su cobertura vegetal corresponde a Páramo (51,1 %), Humedal y/o almohadilla (48,5 %)*** *y formación rocosa (0,5 %) que por sus características corresponde a un hábitat natural*", lo cual implica una alta afectación a ecosistemas sensibles.

Lo anterior se sustenta en observar el mapa de áreas naturales (N°1.1-6), donde se muestra la ubicación del depósito de relaves entre la categoría de "Bosque y vegetación protector" tal como se muestra en la siguiente figura la cual es un extracto del mapa con sus convenciones. Por lo anterior se sustenta que la localización del depósito de relaves se hará en una área altamente sensible dados sus servicios ecosistémicos actuales, asociados al propio significado que tiene pertenecer a la categoría entre áreas protegidas como "bosque y vegetación protector" ya que esta significa que son "*aquellas formaciones vegetales, naturales o cultivadas, arbóreas, arbustivas o herbáceas de dominio público o privado, que estén localizadas en áreas de topografía accidentada, en cabeceras de cuencas hidrográficas o en zonas que por sus condiciones climáticas, edáficas e hídricas, no son aptas para la agricultura o la ganadería, sus* ***funciones son las de conservar el agua, el suelo, la flora y la fauna silvestres****"* (Ministerio del Ambiente, s.f.)[209]

[209] Ministerio del Ambiente. (s.f.). Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Ecuador. Obtenido de http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/es/content/bosques-protectores



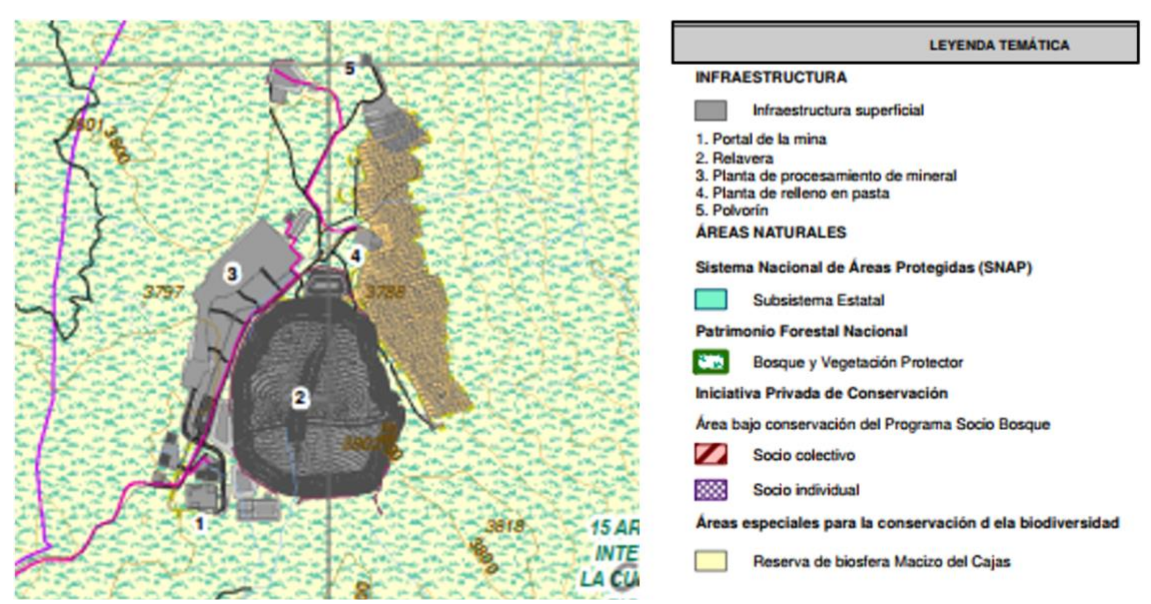


FIGURA 87. MAPA DE ÁREAS NATURALES PROYECTO MINERO LOMA LARGA. FUENTE: MODIFICADO DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)

4.5.2 Características de los relaves

De acuerdo con el informe, los relaves serán tratados por medio de métodos filtrantes para lograr conseguir una humedad de entre el 15 y 18 %. Para el diseño de la relavera se realizaron varios ensayos en los cuales se encontró que los relaves tienen 15% de partículas de tamaño arenas, 75% de tamaño limo y 10% de tamaño tipo arcilla, con una conductividad hidráulica de 1 x 10^{-5} cm/s, ángulo de fricción entre 32° hasta 36°. Además, se asumieron los siguientes parámetros: Densidad seca de los relaves 1,6 Tn/m^3 y un peso específico de los sólidos de 2,62.

El EsIA indica que se realizaron ensayos de caracterización de los relaves que se van a obtener luego del proceso de extracción de los minerales. Sin embargo, únicamente se presenta el valor promedio de la granulometría, el ángulo de fricción, la resistencia no drenada y la conductividad hidráulica, sin conocer la cantidad de ensayos ejecutados y determinar así la representatividad de los datos presentados.

Al no contar con los resultados ni los reportes de laboratorio, no se puede hacer seguimiento y auditar los parámetros indicados. De igual manera, la ausencia de ensayos de identificación y caracterización mecánica aumentan la incertidumbre asociada a los materiales involucrados, lo que se traduce en un mayor riesgo a mediano y largo plazo.

De acuerdo con lo expuesto por INV Metals - Cardno Entrix (2021) el proyecto minero tendrá una vida útil de 12 años con una tasa de producción esperada de 3000 toneladas por día y constará de cinco estructuras principales: portal de lámina y mina subterránea, planta de procesamiento de mineral, planta de relleno de pasta, polvorín y relavera.

Se consigna en el EsIA que cerca de un 53 % de la producción total de relaves será depositada en la relavera, lo que significa una masa de 5,5 millones de toneladas de relaves filtrados, aunque su diseño se plantea para una capacidad de 6 Mt "…*permitiendo así la inclusión de incrementos en cantidad de mineral a procesar a lo largo de la vida útil del Proyecto*" (página 7.66). El otro



porcentaje restante, es decir el 47 % equivalente a 4,8 Mt aproximadamente, serán depositados como relleno de pasta en la mina subterránea.

Por otra parte, en el capítulo 1.4.7 se hace mención de los principales elementos que componen el diseño de la relavera entre los cuales están los caminos de acceso, los sistemas de impermeabilización, sistema de colección interna de aguas lluvia, sistema de colección de aguas subterráneas (bajo la impermeabilización basal), sistema de colección de subdrenaje (sobre la impermeabilización basal) y piscina de aguas de contacto (relavera).

Su respectiva descripción se hace alusión en el capítulo 7.2.4. Instalaciones para manejo de relaves; sin embargo, se hace una caracterización de los materiales y su proceso constructivo, pero no se observa planos de detalle y metodologías que permitan concluir de manera concreta la eficiencia de los sistemas enunciados, y esto es fundamental para el comportamiento del material depositado por su potencial falla por incrementos en la humedad en la relavera como se expuso en el marco teórico.

4.5.3 Disposición de los relaves

La alternativa escogida por tipo de relave generado es la de relaves filtrados, que debe aclararse que, aunque se use para su descripción relaves secos, estos no tienen una humedad igual a cero, sino que disminuyen el porcentaje de humedad, y esta aseveración de "seco" es común encontrarla dentro del documento como se especifica en el capítulo 8.5.1.1. en donde se menciona que después del proceso de filtrado "…*se genera un producto de "**torta seca**", que facilita su manipulación y colocación en el depósito de relaves"*.

En este ítem no se hace alusión dentro del análisis de alternativas por tipo de relave generado a las limitaciones que se tienen al optar por relaves filtrados ya que como se mencionó con anterioridad, tanto la pluviosidad y la evaporación de la zona, el tiempo y área de desecación y la flexibilidad operacional pueden limitar la aplicación del filtrado de relave (Beltrán-Rodríguez, Larrahondo, & Cobos, 2018)[210]. En relación con lo anterior Golder (2013)[211] expone que este tipo de relaves tienen limitaciones operativas de aplicación durante los periodos de moderada a alta precipitación (**mayor de 50 mm** de precipitación total mensual).

Lo anterior plantea que este tipo de relaves filtrados no es apto para la zona del proyecto Loma Larga dado el comportamiento de las precipitaciones mensuales multianuales de las estaciones que se analizaron dentro del EIA se observa claramente que la lluvia mensual sobrepasa el valor de los 50 mm como se puede apreciar en las siguientes graficas asociadas a los histogramas de precipitación extraídas del capítulo 6.1.1. Diagnóstico Ambiental- Línea Base Física Superficial.

[210] Ibid.

[211] Ibid.

Figura 6-5 Histograma de Precipitación Mensual Estación M0141 (1964-2015)

Figura 6-6 Histograma de Precipitación Mensual Estación M0417 (1975-2015)

Figura 6-7 Histograma de Precipitación Mensual Estación PMLL001 (2006-2009)

Figura 6-8 Histograma de Precipitación Mensual Estación PMLL003 (2006-2019)

Figura 6-9 Histograma de Precipitación Mensual Estación PMLL005 (2006-2009)

Figura 6-10 Histograma de Precipitación Mensual Estación PMLL001 (2006-2009)

Figura 6-11 Histograma de Precipitación Mensual Estación PMLL009 (2006-2014)

FIGURA 88. PRECIPITACIÓN MENSUAL MULTIANUAL ZONA DEL PROYECTO LOMA LARGA. FUENTE: INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)

El proceso de compactación requiere ser realizado bajo unas condiciones controladas, en las cuales no se pueden presentar variaciones en el contenido de agua de los materiales. En el EsIA no se presenta ninguna consideración de la construcción del depósito los relaves filtrados en una zona con precipitaciones anuales de más de 900 mm, lo que excede la precipitación media mensual recomendada para el correcto uso de este tipo de relaves. Los detalles de operación no indican cuál



es el plan de contingencia para los días en los que se presenten lluvias y que no se pueda realizar la compactación de los relaves. Lo anterior generaría dos posibles escenarios:

(i) No se compactan los materiales, pero dado que no hay un almacenamiento programado al abrigo de la lluvia, se permite humedecer los relaves por encima del 15 % de contenido de agua, afectando su comportamiento a futuro cuando sean colocados en la relavera, o

(ii) Se compactan los relaves bajo condiciones de lluvia, lo que hace que el proceso constructivo va contra los estándares de calidad y en detrimento de su comportamiento mecánico.

En cualquiera de los dos casos, y teniendo en cuenta que los registros de lluvia presentados indican precipitaciones superiores a 50 mm/mes para todo el año, se afectará el desempeño de la relavera aumentando el nivel en riesgo que se tiene para corto, mediano y (especialmente) largo plazo. Si bien en la fase de cierre y postcierre se espera contar con dicha geomembrana como sistema de cobertura, durante la fase operativa del proyecto no se contará con esta membrana, permitiendo así la infiltración de agua lluvia, aumentando el contenido de agua de los materiales y reduciendo la estabilidad a mediano y largo plazo de los depósitos. La única actividad planteada para el manejo de aguas es la compactación con pendiente mínima superficial de 2 a 4 %.

Dada la importancia del manejo de agua superficial en la zona del depósito de relaves se deben tener detalles de los análisis realizados para el cálculo de la precipitación y por ende los caudales usados para los diseños de estructuras de drenaje, dado que en el capítulo 7.2.4.1.3. Sistema de manejo de agua cuando refiere a canaletas permanente de desvío de aguas lluvias en torno al depósito de relaves menciona:

> "*Este sistema está conformado por una serie de canaletas exteriores ubicadas perimetralmente alrededor de la relavera, las cuales fueron dimensionadas para* ***contener el caudal máximo generado por una lluvia de diseño con un período de recurrencia de 100 años y duración de 24 horas (83 mm)****"*.

No se encontró dentro del EsIA cálculos asociados a la tormenta de diseño requerida y, por tanto, **no se pudo establecer cómo se llega a este valor** de 83 mm.

De igual forma cuando se menciona los sistemas de drenaje temporal también se menciona como caudal de diseño el flujo máximo generado "(…) *por una lluvia de dos años de período de recurrencia y 24 hora de duración (38 mm")*, cuyo cálculo tampoco es claramente identificado dentro del documento. Estos análisis de tormenta de diseño son sumamente relevantes dado que **no contar con un adecuado cálculo puede conllevar el diseño un sistema de drenaje con capacidad insuficiente para el comportamiento de las precipitaciones de la zona, lo que implica que los relaves filtrados puedan aumentar su humedad y por tanto su falla pueda considerarse como más probable**. De hecho, dentro del EsIA en su capítulo 7.4.3 Manejo de precipitaciones y escorrentía natural afirman que "*La mina se ubica en una* ***zona de alta precipitación****, de ahí que el manejo de la entrada de agua*", en este sentido al ser una zona de alta precipitación el diseño del sistema de drenaje debe ser detallado.



4.5.4 Consideraciones para la estabilidad de los relaves

El EsIA indica que se evaluó la estabilidad de la relavera en dos secciones generadas. Estos análisis no son presentados y no se indica que se determinó el nivel de estabilidad global y local del depósito, o cuales fueron las consideraciones e hipótesis planteadas durante los análisis, ni la probabilidad de falla para cada una de las etapas operativas del proyecto.

Para los muros de confinamiento de la relavera, el EsIA indica:

> *"Dado que la totalidad de la superficie de la relavera será impermeabilizada con geomembrana, el análisis asume que el muro se mantendrá en condiciones no saturadas durante toda la vida útil de la estructura."*

La anterior afirmación desecha la posibilidad de infiltración durante la fase constructiva y de operación o la posibilidad de fallas en el sistema de impermeabilización a lo largo de la vida útil de la relavera (para el cual no se especifica el tipo de mantenimiento a realizar durante toda su vida útil, y se planea de forma preliminar dejar el monitoreo a los 5 años). No puede analizarse como verdad absoluta, sino que es conveniente realizar una evaluación del escenario ante un aumento de humedad por cambios en la operatividad originados por imprevistos que ningún tipo de proyecto está exento, particularmente cuando la relavera se dispondrá para siempre en el territorio.

El sistema de impermeabilización con el que se cuenta en la base del depósito de relaves evitaría el flujo desde y hacia los relaves por la base. El EsIA no indica ninguna precaución o afectación a la estabilidad general del depósito al contar con una superficie preferencial de deslizamiento, tal como se puede constituir el contacto de la membrana impermeable con el terreno natural saturado y con posibilidad de contar con agua libre, situación observada en el trabajo de campo de TERRAE.

Para el diseño de los depósitos de relaves, existen ciertas recomendaciones de los lineamientos que se deben seguir en cuanto a las cargas sísmicas a considerar:

> *"Según la regulación de FEMA[212], un Potencial de Peligro Significativo implica que «no hay pérdida probable de vidas humanas, pero puede causar la pérdida económica, el daño ambiental o la interrupción en las instalaciones vitales debido a la falla o mal funcionamiento de la presa».30 Para las presas bajo esta categoría, las regulaciones de FEMA exigen lo equivalente a un diseño apto para un terremoto con intervalo de recurrencia de 10,000 años, o un terremoto para el cual la probabilidad anual de falla es 1 en 10,000." (*Morrill, J., et al.,2020)

En el caso en el que se considere e identifique que se puede presentar la pérdida de por lo menos una vida humana, la probabilidad de falla ya no sería de 0,01 % como se indicó anteriormente, sino de 0,001 % (diseño mejor que el promedio). Sin embargo, el EsIA presentado para el proyecto Loma Larga contempló un sismo de diseño para la relavera con un periodo de retorno de 2475 años, empleando requisitos menores a los necesarios en le evaluación geotécnica de un depósito con posibilidades de daños ambientales irreversibles.

El estudio presentado indica que se realizaron análisis de estabilidad pseudoestáticos, diferenciando las solicitaciones sísmicas empleadas para las Fase 1, Fase 2 y Fase 3. No es clara la solicitación

[212] Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés.



empleada para cada una de las fases en su componente vertical y horizontal, por lo que no se puede hacer seguimiento a la coherencia de dicho análisis con los análisis sísmicos presentados en otras secciones del documento.

De los análisis sísmicos realizados, los únicos datos que se logran observar son:

> *“Los resultados del análisis de desplazamientos indican que podrían ocurrir movimientos de materiales de hasta* ***3 m*** *de deformación*[213] *en la superficie de relaves a lo largo del sector sur de Fase 1 para el sismo operacional; sin embargo, estas deformaciones se encontrarían confinadas por la berma temporal de Fase 1 y no resultaría en derrames fuera del área de contención. Las deformaciones en el largo plazo para el caso del sismo máximo creíble en la configuración final de la relavera serían menores a* ***un metro****, y estarían ubicadas principalmente en el talud externo de los muros de enrocado perimetral y, de igual forma, estos no implicarían derrames de relaves fuera del área de contención.”*[214]

No es claro ni lógico, que el contar con desplazamientos de 3 m para la fase operativa, y de 1 m para el largo plazo en el enrocado externo, no implique la posibilidad de falla del sistema de contención y confinamiento de los relaves. Tampoco es claro cómo se llegó a estos resultados cuando no se tienen ensayos de comportamiento mecánico de los materiales que van a conformar dicho muro, ignorando completamente sus propiedades y la forma en la que responderán ante diferentes solicitaciones a lo largo de su vida útil. Las afirmaciones realizadas pueden deberse a errores en los modelos de estabilidad implementados, a los cuales no se les puede hacer seguimiento debido a que no son presentados en el estudio.

Para la etapa de cierre, no se presentan los modelos de estabilidad analizados, ni las consideraciones y suposiciones que permitieron determinar la geometría final de la relavera. Únicamente se presenta un perfil del muro de la relavera (Figura 89), en el que no se logra apreciar el depósito de relaves propiamente, haciendo imposible emitir algún concepto sobre la viabilidad de su construcción. El no contar con factores de seguridad o probabilidades de falla, no permiten analizar si los diseños propuestos se encuentran por el lado seguro, o si por el contrario representan una condición de falla latente.

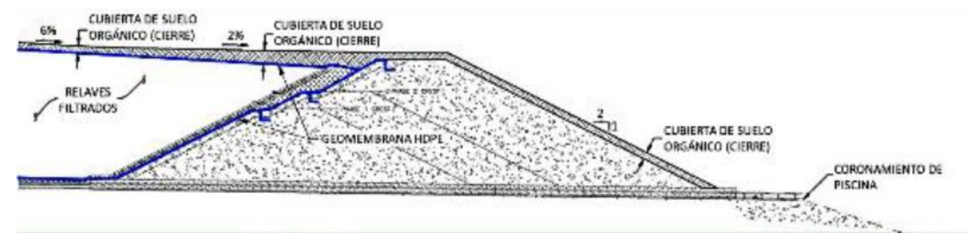


FIGURA 89. PERFIL DEL MURO DE LA RELAVERA. FUENTE: FIGURA 7-99 DEL ESIA INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021).

Aunque se indica que la estrategia de cierre de la relavera incluye actividades de mantenimiento, no se indica que tipo de mantenimiento, siendo una afirmación que no permite establecer la idoneidad de las actividades planteadas.

---

[213] Se asume que se trata de un error conceptual, y que se trata de desplazamientos de 3 m. Las deformaciones, por su definición, son adimensionales al relacional un desplazamiento sufrido, respecto a la dimensión original del elemento.

[214] Subrayado y negrilla fuera del texto original.



Como es evidente, existen una serie de vacíos, omisiones y deficiencias en la información presentada en un aspecto tan importante como el estudio de las lluvias, particularmente en su relación con los relaves. Es probable que estas deficiencias hayan desencadenado una serie de omisiones en el estudio de la probabilidad de falla de la relavera con lo que no es posible tener conocimiento de la afectación que se puede causar en ese escenario, que involucra vulnerabilidad de personas ubicadas aguas abajo.

4.5.5 Análisis de probabilidad de falla por de los relaves

Como se mencionó con anterioridad, en el EsIA se observa que se tienen planteados varios sistemas de drenaje para el control de la escorrentía, los cuales están conformados por una serie de canales ubicados alrededor del depósito de relaves, con el objetivo de evitar el ingreso de agua hacia el interior de la relavera y también cuenta con un sistema de subdrenajes para recuperar el agua de infiltración y canaletas que conducen la escorrentía que cae sobre el depósito de relaves.

El agua será conducida a una piscina exterior, la que tendrá la capacidad de contener la lluvia de periodo de retorno de 100 años durante 24 horas para la fase 1. En la fase operacional, la piscina tiene la capacidad volumétrica para contener entre 8 y 10 días de flujo continuo de los subdrenes más la escorrentía máxima para periodo de retorno de 10 años en un año húmedo (Figura 90).

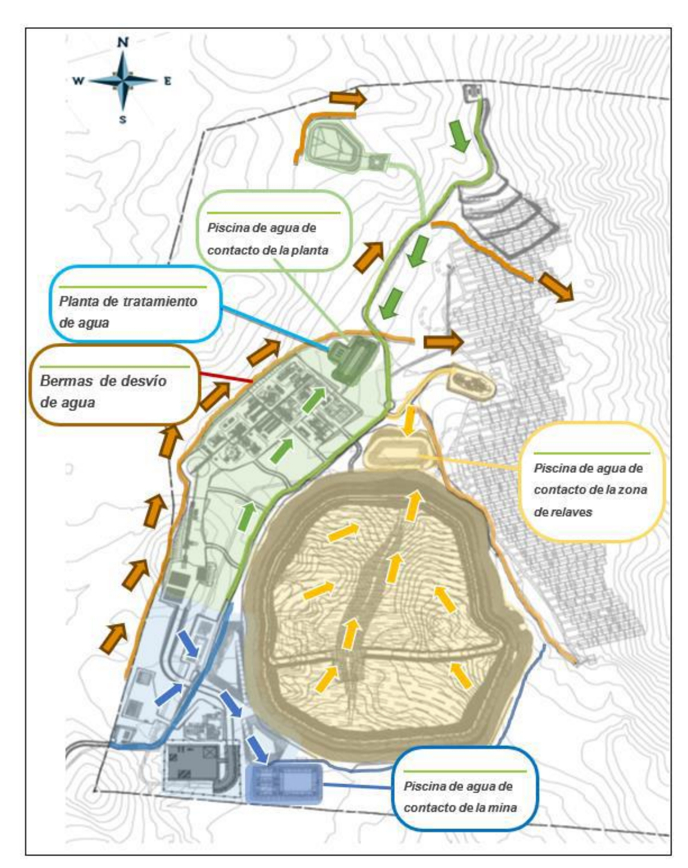


FIGURA 90. SISTEMA DE DRENAJE EXPLOTACIÓN MINERA FUENTE: INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)



Si bien se presenta el diseño básico de las canaletas de desvío, los subdrenes y la piscina exterior donde se conducirá el agua, no se presenta ningún análisis de los tiempos de tránsito o cuánto tiempo permanecería el agua dentro de la relavera luego del evento de precipitación de diseño. Lo anterior es importante ya que la precipitación caída directamente en la relavera, puede generar un aumento en la humedad de los relaves que pueden generar inestabilidades del depósito.

Por otra parte, en los mapas y figuras presentadas no es clara la ubicación de los canales y subdrenes, por lo cual no es posible determinar si el diseño realmente haría un manejo correcto de la escorrentía en la zona del depósito de relaves.

Respecto a la posibilidad de que el material fluya en caso de un sismo (presente licuación o licuefacción), el EsIA dice:

> *"La licuefacción puede ocurrir dentro de depósitos granulares sueltos y saturados. Si se experimentan temblores significativos, los depósitos de relaves y el aluvión saturado en los drenajes permanentes tienen el potencial de licuar. El potencial de asentamiento sísmico de licuefacción de depósitos saturados y naturales no se espera en base a la compresión del subsuelo".*[215]

Sin embargo, la última afirmación no presenta ningún sustento ni ninguna valoración que permita asegurar que no hay posibilidades de que la relavera y los materiales de fundación de los depósitos de materiales presenten fallas (ya sea progresivas o catastróficas) en caso de sismo. Esta evaluación no se realiza tampoco para el caso de la licuación estática, la que se presentaría si se tienen tasas de crecimiento de la relavera elevadas e infiltraciones de agua de forma simultánea.

La evaluación de la licuación es quizás el escenario de falla que requiere mayor atención (y que fue pasado por alto por en el EsIA), ya que es el tipo de falla que tendría un mayor alcance en el área afectada, generando daños irreversibles en el ambiente en un área de gran extensión. Tal como se ha menciona, no hay consideraciones al respecto en los documentos disponibles; dentro de la información suministrada no se realiza ningún análisis de falla de los relaves por un aumento de la humedad de los mismos (hidratación) y dentro del EsIA se asume directamente que el sistema de subdrenaje es suficiente. Sin embargo, en un escenario que puede involucrar la pérdida de vidas humanas, es conveniente de nuevo resaltar que no existe ningún diseño hidráulico de dichos subdrenes por lo cual se tiene un riesgo claro de que, en condiciones de precipitación extrema, los relaves puedan absorber agua y empezar un proceso de evolución de comportamiento de sólido a fluido.

Además, no se presenta ningún análisis de escenarios de precipitación en los que los canales perimetrales puedan fallar por capacidad hidráulica y su consecuente afectación en el depósito de relaves. En el capítulo 5 sobre aspectos y riesgos geotécnicos se plantearán las deficiencias en no considerar las actuaciones en escenarios de lluvias sobre la relavera.

4.5.6 Modelo de falla del depósito de relaves

En el EsIA se pudo verificar que no hay un análisis específico de riesgos para falla del depósito de relaves que contemple un posible movimiento en masa del material donde se evalúen las

[215] Página 6-90 del EsIA.



trayectorias del volumen removido ante cambios en la saturación. Dado que los escenarios de riesgos deben analizarse, incluso si se considera una baja probabilidad de ocurrencia, pues sus consecuencias son altamente negativas para el entorno natural y comunidades aledañas, es indispensable realizar un adecuado plan de gestión de riesgo ante esta amenaza antrópica. La omisión de estos aspectos es gravísima y puede llevar a las autoridades ambientales a tomas de decisiones no fundamentadas o falsamente soportadas.

Son inaceptables las omisiones si es evidente de la lectura del EsIA capítulo 6.1.1.4. Sismicidad que se tiene conocimiento de que las condiciones del proyecto de Loma Larga tienen una calificación de peligro alta:

> "*Para las estructuras de tierra, como las relaveras, la clasificación de peligros está comúnmente definida por las directrices de la Asociación Canadiense de Presas (CDA, 2014) basadas en la altura, el almacenamiento, la población aguas abajo en riesgo, los hábitats clave o las especies en riesgo, los recursos culturales en riesgo y las posibles pérdidas económicas. La evaluación actual supone que una calificación de* ***peligro "alta" es conservadoramente apropiada*** *para la presa de relaves propuesta y* ***se basa principalmente en los riesgos ambientales y culturales****, pero esta calificación debe ser revidas durante el diseño final".*

Independientemente del diseño final, este tipo de depósito de relaves sigue teniendo una capacidad de albergar 6 Millones de toneladas de residuos con una humedad que puede variar por cambios debido a las condiciones naturales de lluvias en la zona y a imprevistos inherentes en la operatividad.

Adicionalmente, en el capítulo 12.4.1.4 Daño de la relavera, se dice que "*el riesgo debido a la ruptura de la relavera se califica como* ***IRRELEVANTE****; es decir, se tiene un riesgo probable con consecuencias irrelevantes; sin embargo, los estándares de calidad constructivos y operativos de la* ***relavera tienen la capacidad de mitigar la probabilidad de ocurrencia de este riesgo****"* **Calificar como irrelevante las consecuencias de una falla de un depósito de relaves de las dimensiones de este proyecto, ubicado en la parte más alta de cuencas altamente pobladas es optar por no realizar un análisis de riesgo veraz y es completamente irresponsable.** No hay un sustento o análisis que permita identificar las probabilidades de falla mediante una modelación de los escenarios futuros que se presentarán durante las etapas de operación, cierre y postcierre de la mina; el EsIA debería contemplar el peor escenario posible, con el fin de poder contar con los planes de contingencia que deben ser implementados en cado de presentarse dicha situación.

Los escenarios de riesgos se plantean para poder atender las amenazas en este caso antrópicas que se puedan generar; eludir el escenario basándose en que todo saldrá como lo esperado no es realizar análisis de riesgos adecuados.



Tabla 12-14 Evaluación de Riesgos Físicos del Proyecto sobre el Ambiente

Riesgos Físicos	Frecuencia	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Población Afectada	Probabilidad	Consecuencia	Riesgo
Incendios y/o explosiones	Ocurre 1 o más veces a lo largo de 10 años (3)	Poca (2)	Muy peligrosa (4)	Local (2)	Muy Alta (4)	3	4	12
Derrames de sustancias contaminantes	Ocurre 1 o más veces a lo largo de 10 años (3)	Poca (2)	Poco peligrosa (2)	Local (2)	Muy Alta (4)	3	3	9
Colapso de Infraestructura	Ocurre 1 o más veces a lo largo de 100 años (1)	Poca (2)	No peligrosa (1)	Local (2)	Muy Alta (4)	1	2	2
Daño de la relavera	Ocurre 1 o más veces a lo largo de 100 años (1)	Poca (2)	Peligrosa (3)	Local (2)	Muy Alta (4)	1	3	3
Subsidencia de mina y galerías	Ocurre 1 o más veces a lo largo de 100 años (1)	Poca (2)	Muy peligrosa (4)	Puntual (1)	Muy Alta (4)	1	4	4

TABLA 14. EVALUACIÓN RIESGOS FÍSICOS. FUENTE: MODIFICADO DE INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)

En conclusión, en cuanto al análisis de falla del depósito de relaves, dentro del estudio realizado no se presenta ningún análisis más allá del efecto que puede generar la sismicidad del sector, a partir del cual se afirma que, con los análisis realizados a los taludes y el sistema de drenaje, el riesgo de falla de la relavera es *"Irrelevante"*. **Dicha conclusión es determinada a partir de la suposición de buenas prácticas ingenieriles que no están justificadas técnicamente con un análisis real de la posibilidad de falla por la hidratación y posterior licuefacción de los relaves, y las posibles consecuencias aguas abajo del depósito**.

La irresponsabilidad de la empresa minera es aún mayor si se considera el cambio climático: De acuerdo con el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas (Climate Change 2022 Impacts, Adaptation and Vulnerability):

> *"La frecuencia de eventos extremos de temperatura y precipitación en el clima actual cambiará con el calentamiento, con extremos cálidos cada vez más frecuentes (prácticamente seguro), los extremos fríos se vuelven menos frecuentes extremadamente probable) y las precipitaciones extremas se vuelven más frecuentes en la mayoría de los lugares (muy probable)"* [216](subrayado fuera de texto)

De acuerdo con (Morril, y otros, 2022)[217], la zona de influencia debe incluir el área que se vería afectada en caso de una falla del depósito, lo anterior es debido a que los relaves pueden viajar muchos kilómetros aguas abajo en caso de una ruptura, condición no incluida dentro del área de influencia del proyecto Loma Larga. Adicionalmente, los depósitos de relaves deben ser diseñados para soportar un terremoto y una precipitación (inundación) con 10,000 años de periodo de retorno.

---

216 Arias, P.A, et al,. 2021: Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33−144, doi:10.1017/9781009157896.002.

217 Morrill, J., Chambers, D., Emerman, S., Harkinson, R., Kneen, J., Lapointe, U., Maest, A., Milanez, B., Personius, P., Sampat, P., and Turgeon, R. (2022), Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management, Earthworks, MiningWatch Canada and London Mining Network.



Además, los autores recomiendan que **los depósitos de relaves no deben ser construidos, si durante la operación no se puede asegurar la evacuación segura de la población que se encuentra ubicada dentro del área de influencia**. **Tampoco se deben construir en lugares donde una falla del depósito pueda afectar cuerpos de agua donde sea captada agua para el consumo** o zonas críticas ambientalmente.

Aguas abajo de la zona donde se plantea la construcción del depósito de relaves, se encuentran ubicadas viviendas, captaciones de agua de la población, y sumado a lo anterior, el depósito se ubica en un ecosistema muy importante ambientalmente como lo es el páramo, donde se presentan nacimientos de agua.

Sumado a lo anterior, como se mencionó anteriormente el diseño del sistema de drenaje no se encuentra con el suficiente respaldo técnico ya que no se observan diseños de las redes de subdrenaje y, además, los canales están diseñados para periodos de retorno de 100 años, lo cual no es suficiente de acuerdo con Morril, y otros (2022)[218] para asegurar la estabilidad, especialmente en zonas de alta precipitación como lo es la zona de estudio.

Debido a lo anterior, es necesario realizar un análisis de falla del depósito, con el fin de determinar las afectaciones que se pueden presentar aguas abajo del depósito de relaves y con ello determinar el riesgo al que está expuesta la población y el ecosistema, ya que es una estructura que genera una condición de amenaza a los habitantes del sector, situación no analizada con la profundidad requerida en este tipo de estudios. La empresa minera no cuenta con ningún estudio de modelamiento o al menos esta temática no es incluida dentro del EsIA que ha sido presentado para conseguir la viabilidad ambiental para la explotación.

El análisis de falla es crucial ya que las rupturas de relaveras que se han presentado en otras zonas del mundo en el pasado, han dejado grandes pérdidas en términos económicos, vidas y ambientales para las comunidades que se encuentran ubicadas en las zonas aledañas a este tipo de explotaciones, lo cual no ha sido evaluado dentro del EsIA. A partir del análisis que se realice de la falla del depósito, se debe incluir un plan de gestión del riesgo donde estén incluidos los pasos a seguir, en dado caso de que se presente la falla.

Por todo lo anterior, se reitera que el enfoque preventivo es el que recomendamos sea adoptado por las autoridades ecuatorianas, prohibiendo la disposición de relaves a cielo abierto.

4.6 Conclusiones y recomendaciones

Dentro del estudio no se presenta ningún análisis de falla del depósito de relaves, así como tampoco se analiza la amenaza aguas abajo de la explotación minera. Es necesario realizar un análisis de la posibilidad de falla por hidratación de los relaves y su consecuente licuefacción, ya que no se cuenta con diseño técnicos del sistema de drenaje de la relavera y, por ende, no se puede afirmar que dicho sistema hidráulico realmente evite el aumento de la humedad del depósito.

En este sentido, si bien se hace un análisis de las diferentes variables climatológicas de la zona, los análisis de correlación realizados para la extensión y llenado de datos faltantes de precipitación, no presentan buenos ajustes, por lo cual se tiene demasiada incertidumbre en el comportamiento real

---

[218] Ibid.



de la precipitación en la zona, y por tanto el diseño de obras para manejo de aguas dentro del depósito de relave no tiene sustento técnico adecuado.

Por otra parte, la metodología utilizada para la determinación de los caudales no se encuentra en rangos aceptables para la validación de los parámetros, razón por la que los caudales determinados se encuentran subestimados de acuerdo con los valores medidos, ya que el modelo utilizado no representa de manera adecuada los valores máximos. Lo anterior, afecta directamente la línea base ya que se tendría una subestimación en los promedios mensuales de oferta hídrica en la zona. Por otra parte, en cuanto al análisis hidrológico superficial no se presenta ningún escenario con la implementación de obras, por lo cual no es posible determinar cuál será la afectación real sobre los caudales aguas abajo del proyecto, incluido lo que se drene dentro del sistema de manejo de aguas en el depósito de relaves. Este análisis debe ser incluido ya que el desarrollo de la explotación será realizado en zonas de páramo y humedales, claves para el abastecimiento de agua de la región.

Además, se debe incluir un análisis del impacto que puede llegar a tener el escenario de ruptura de la relavera, en los asentamientos aguas abajo de la extracción minera, ya que debido a la zona de alta pendiente donde está ubicada, los relaves pueden viajar grandes distancias si se llega a presentar dicho proceso de ruptura del depósito, afectando las poblaciones y el ecosistema que se encuentran aguas abajo del depósito.

Debido a la falta de análisis y diseños con soporte técnico, dentro del EsIA no se puede afirmar que el depósito de relaves no presenta un escenario de riesgo a la población como se afirma en el documento, ya que se cuenta con un alto nivel de incertidumbre respecto al comportamiento a mediano y largo plazo de dichos materiales. Esto es de especial gravedad ya que se trata de depósitos que se encontrarán de forma permanente (para siempre) ubicadas en el territorio, representando una fuente de peligro para las comunidades y el medio ambiente.



5. COMPONENTE DE RIESGOS GEOTÉCNICOS Y ASPECTOS DE ESTABILIDAD

A continuación, se presentan los principales aspectos relacionados con la estabilidad de las obras civiles a construir, así como las consideraciones pertinentes a los riesgos geotécnicos que involucran el eventual desarrollo del proyecto minero.

5.1 Marco de Referencia

Sin excepción, y en particular el tipo de obras del proyecto mencionadas anteriormente, las propuestas de intervención en ingeniería implican una alteración al ambiente (por ejemplo: materiales de préstamo o emplazamiento de los proyectos). En las diferentes etapas de un proyecto (ingeniería de perfil, prefactibilidad, factibilidad, ingeniería de detalle, ejecución, operación y cierre) se debe contar con una armonía entre cuatro aspectos principales, como lo son Ambiente – Economía – Ingeniería – Equidad (Basu, Misra & Puppala, 2015[219]). Dentro de las relaciones existentes de estos cuatro pilares presentados en la siguiente figura, se destacan los posibles conflictos que se establecen entre la ingeniería y los demás componentes, durante el desarrollo de los proyectos. Se enfatiza, y son de particular importancia, la marginalización social y la sobreexplotación de los componentes ambientales.

La contaminación y sobreexplotación de elementos naturales compete de forma directa a la ingeniería geotécnica, la cual debe propender y velar por el correcto uso de los materiales, así como por la protección del entorno en el que se encuentran las obras y por la seguridad de los usuarios durante la vida útil y posterior al cierre y desmantelamiento respectivo.

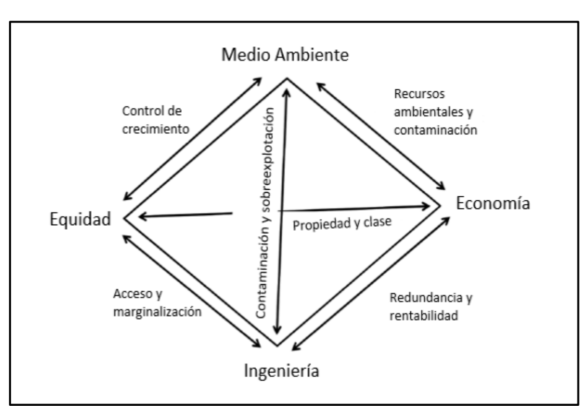


FIGURA 91. SOSTENIBILIDAD DE PROYECTOS DE INGENIERÍA. FUENTE: MODIFICADO DE BASU, *ET AL.* (2015).

Dentro de la evaluación de la eficiencia de los diseños, se encuentra el correcto uso de la práctica de la ingeniería. La construcción de estructuras civiles debe verse soportada en diseños que garanticen la estabilidad local y global de la estructura ante distintas solicitaciones externas. Los proyectos deben contemplar las recomendaciones de cimentación para las superestructuras (como los edificios o puentes), las recomendaciones de geometría y materiales para obras masivas (como

[219] Basu, D., Misra, A., & Puppala, A.J. (2015). Sustainability and geotechnical engineering: perspectives and review. Canadian Geotechnical Journal (52), pp 96-113. dx.doi.org/10.1139/cgj-2013-0120.



las presas), y las recomendaciones constructivas necesarias para garantizar el correcto funcionamiento de las obras (Orr, 2012[220]; WSDOT, 2010[221]).

El proceso de diseño de las estructuras geotécnicas suele enmarcarse en un marco conceptual en el que se deben correlacionar tres aspectos independientes, pero que se encuentran relacionados de forma permanente Burland (2012)[222]: perfil del subsuelo, comportamiento mecánico de los materiales, modelo de comportamiento apropiado. Se debe contar con una relación equilibrada de estos aspectos, tal como se presenta en la siguiente figura, de forma tal que se logre equilibrar la experiencia a partir de casos históricos y el análisis conceptual, con la validación apropiada y constante en las distintas etapas del proyecto.

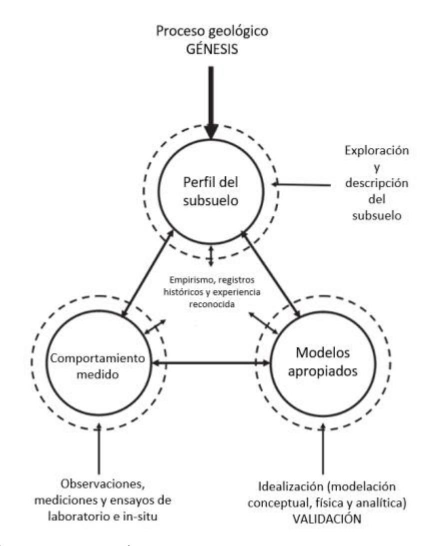


FIGURA 92. TRIÁNGULO GEOTÉCNICO. FUENTE: MODIFICADO DE BURLAND (2012)

El primer paso para realizar una correcta práctica ingenieril corresponde con la exploración y caracterización de los materiales térreos que componen la zona de estudio y de aquellos que serán empleados como materiales de construcción (Burland, 2012). Existen diferentes técnicas de exploración del subsuelo, las cuales suelen ser clasificadas como directas en caso de estar relacionadas con la ejecución de apiques y perforaciones con recuperación de muestras, e indirectas en el caso de no realizar toma de muestras (Davis, 2012)[223]. Estas técnicas deben ser usadas de forma paralela, de forma tal que se tenga conocimiento de diferentes parámetros que controlan el comportamiento del suelo.

Tanto para el caso de obras superficiales, como para el caso de obras subterráneas, se cuentan con distintos manuales y reglamentos nacionales que dan los lineamientos mínimos de la exploración requerida. Para el caso de túneles, y en el contexto latinoamericano, los manuales vigentes indican la exploración recomendada para contar con un nivel adecuado de conocimiento del terreno. El

[220] Orr, T. (2012). Codes and standards and their relevance. En ICE Manual of Geotechnical Engineering, Capítulo 10, pp 105-124
[221] Washington State Department of Transportation – WSDOT (2011). Geotechnical Design Manual. Geotechnical services.
[222] Burland, J.B. (2012). The geotechnical triangle. En ICE Manual of Geotechnical Engineering, Capítulo 4, pp 17-26
[223] Davis, J. (2012). Ground Exploration. En ICE Manual of Geotechnical Engineering, Capítulo 46, pp 619-627



Manual de Túneles de México (SCT, 2016)[224] recomienda realizar perforaciones cada 100 m o cada vez que se identifiquen estructuras geológicas relevantes que influencien el comportamiento de la excavación. Adicionalmente, el Manual de Túneles para Colombia (2015)[225] recomienda que cuando el macizo presente múltiples fallas y fracturas sub-verticales, se realicen múltiples perforaciones sub-horizontales. La tabla 4-4 de dicho manual recomienda para longitudes de túnel superiores a 5 km al menos cuatro perforaciones verticales o sub-verticales y dos perforaciones en el área de los portales. El manual reitera que se debe realizar un número suficiente de perforaciones que permita caracterizar la totalidad del alineamiento del proyecto.

Una vez se cuenta con exploración directa e indirecta del subsuelo, se deben realizar mediciones del comportamiento bajo condiciones controladas que representan de forma adecuada la forma en que estos se encontrarán sometidos a las distintas solicitaciones del proyecto. Esto se logra mediante ensayos de laboratorio que cuentan con procedimientos previamente establecidos y estandarizados, mediante los cuales se obtienen los insumos necesarios para aplicar modelos analíticos con los que se busca predecir el funcionamiento de las estructuras a construir. Si no se cuenta con parámetros establecidos de forma correcta mediante las mediciones de campo y de laboratorio, los modelos que se implementen arrojarán resultados no confiables, que no representarán en ninguna medida el comportamiento del sistema analizado.

El uso de modelos matemáticos que permiten calcular la distribución de esfuerzos debido a una perturbación en el medio, tal como lo es la excavación de un túnel o la generación de una obra en superficie, es esencial para determinar el sostenimiento a emplear. Sin embargo, la calidad de los resultados depende de los insumos suministrados para realizar los cálculos. No obstante, los modelos numéricos no pueden ser usados sin criterio ingenieril. Existen diferentes condiciones que deben ser controladas por el diseñador y a las cuales se le debe hacer un seguimiento exhaustivo durante la totalidad de las etapas de modelación.

Estos métodos de análisis deberán reflejar de manera adecuada las solicitaciones a las que se verá sometido el sistema general. En la geotecnia se suelen evaluar tres solicitaciones cuya conjunción genera diferentes escenarios de análisis: cargas gravitacionales estáticas, cargas dinámicas y variación en los niveles freáticos.

Las cargas gravitacionales estáticas corresponden con las cargas que estarán presentes en todo momento en las estructuras y corresponden a la configuración propia de la construcción en términos de materiales y geometría. Por su parte, las cargas dinámicas corresponden, en general, a cargas transitorias que tienen distintas frecuencias de actuación. Estas cargas tienen distintas fuentes de origen que pueden ser naturales o antropogénicas, dentro de las que se destacan los sismos y las vibraciones inducidas por detonaciones y tránsito vehicular respectivamente. Finalmente, la variación de los niveles freáticos modifica la respuesta de los materiales térreos mediante el cambio en su resistencia y en sus propiedades de compresibilidad.

Los análisis de sismicidad deben incluir la posibilidad de detonación de movimientos en masa debido a la ocurrencia de eventos sísmicos. Para esto, se debe evaluar la posibilidad que un sismo de una

[224] SCT (2016). Manual de diseño y construcción de túneles de carretera. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Técnicos. Estados Unidos Mexicanos

[225] INVIAS (2015). Manual para diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera.



magnitud y a una distancia del sitio de interés dada, detone uno o más deslizamientos (Rodríguez, 2001)[226]. Hay casos como el reportado por Rodríguez *et al.* (1999)[227] en donde un evento de magnitud 5,8 detonó eventos a más de 100 km desde el epicentro y los resultados reportados por Jibson y Harp en el año 2012[228] en donde un sismo de magnitud 5,8 y profundidad de 6 km (sismo de Mineral, Virginia) detonó caídas de rocas y pequeños deslizamientos a una distancia de 200 km desde el epicentro.

Keefer (1984)[229] presentó la relación entre la magnitud del evento sísmico y la distancia máxima desde el epicentro en que se generan deslizamientos. Estas relaciones han sido comprobadas por estudios posteriores (Rodríguez *et al* (1999), Bommer y Rodríguez (2002)[230], Hancox, Perrin & Dellow (2002)[231], Keefer (2002)[232]), en los que se muestra que la magnitud mínima a evaluar para determinar la posibilidad de grandes movimientos en masa corresponde con una magnitud de momento de 4. Sin embargo, debido a la incertidumbre asociada al corto lapso para el cual se tienen registros instrumentales, es prudente tomar la mínima magnitud de los sismos que se han registrado como detonantes de movimientos en masa, como el caso del sismo con magnitud 2,9 en Ledu, Qinghai, China (Rodríguez *et al*, 1999). Bommer y Rodríguez (2002) realizaron el ajuste del área máxima afectada por sismos inducidos por deslizamientos, relacionado con la magnitud de cada evento, para el caso específico de Centro América; este constituye una estimación para unas condiciones más ajustadas al contexto americano, presentada en la figura 93.

Las acciones dinámicas debido a sismos y los niveles de precipitación presentados en la zona, deben ser evaluados de forma simultánea en la determinación de la amenaza por movimientos en masa (Rodríguez *et al.*, 1999). Dentro de las metodologías más reconocidas y empleadas se encuentra la metodología presentada por Mora y Vahrson (1994)[233], la cual ha sido empleada desde 1993 y se encuentra referenciada en los manuales de zonificación de la ISSMGE (*International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*). De esta forma, se contempla tanto la modificación en la resistencia de los materiales como el aumento en las solicitaciones externas impuestas a las obras. El no analizar de forma conjunta las cargas dinámicas y las modificaciones del nivel freático, puede sobrevalorar el comportamiento geotécnico de los materiales, subvalorando el riesgo asociado a su falla.

[226] Rodríguez, C.E. (2001). Hazard assessment of earthquake-induced landslides on natural slopes. Tesis de doctorado. Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.
[227] Rodríguez, C.E., Bommer, J.J., & Chandler, R.J. (1999). Earthquake-induced landslides: 1980–1997.
[228] Jibson, R.W., & Harp, E.L. (2012). Extraordinary distance limits of landslides triggered by the 2011 Mineral, Virginia, earthquake.
[229] Keefer, D.K. (1984). Landslides caused by earthquakes.
[230] Bommer, J.J., Rodríguez, C.E. (2022). Earthquake-induced landslides in Central America. Engineering Geology, Vol 63, pp 189-220.
[231] Hancox, G.T., Perrin, N.D., Dellow, G.D. (2002) Recent studies of historical earthquake-induced landsliding, ground damage, and intensity in New Zealand. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 35 No. 2, pp59-95
[232] Keefer, D.K. (2002). Investigating landslides caused by earthquake – A historical review. Surveys in Geophysics 23: 473-510.
[233] Mora, S; & Vahrson, W-G. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. Bulletin of the Association of Engineering Geologists. Vol. XXXI, No. 1, pp. 49-58.

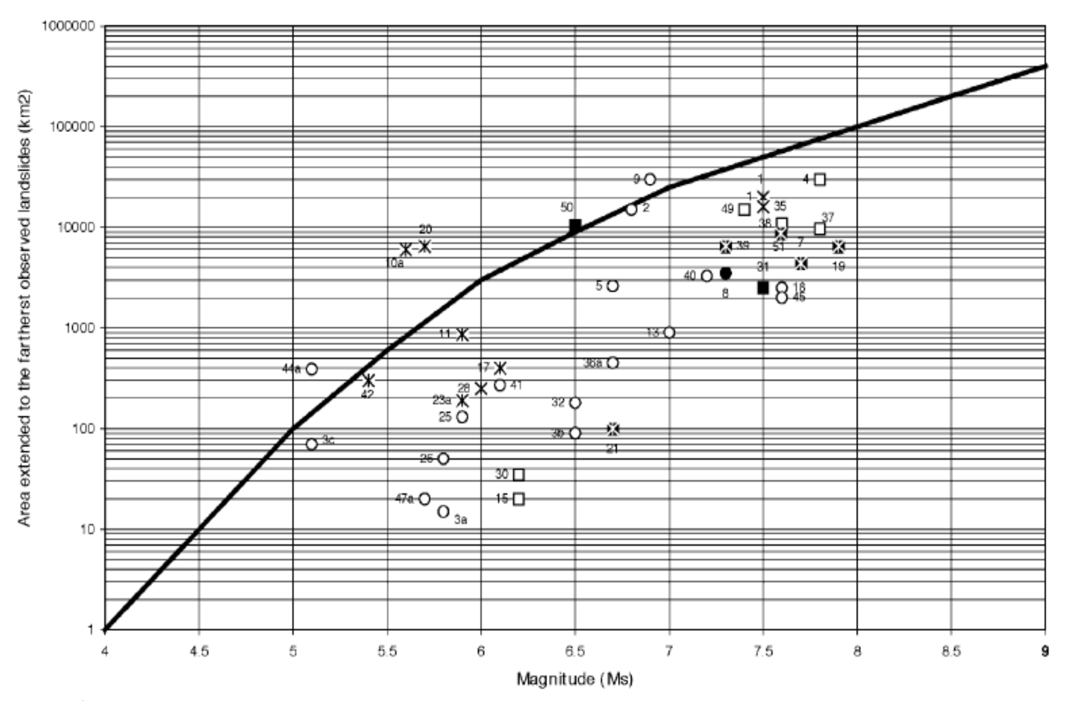


FIGURA 93. ÁREA EXTENDIDA AL DESLIZAMIENTO DETONADO POR SISMO MÁS LEJANO DEL EPICENTRO, AJUSTADO A LOS CASOS DE CENTROAMÉRICA. DISTINTAS CONVENCIONES REPRESENTAN SISMOS DE DIFERENTES PAÍSES.

FUENTE: BOMMER Y RODRÍGUEZ (2002).

El análisis en conjunto de los distintos métodos de análisis refleja el nivel de estabilidad mediante el uso de factores de seguridad o mediante el cálculo de probabilidades de falla. Los factores de seguridad se basan en análisis determinísticos en los cuales se determina la relación entre la resistencia máxima de los materiales y la resistencia movilizada debido a las solicitaciones involucradas. Sin embargo, estos análisis no logran involucrar la confiabilidad de las estructuras para diferentes modos de comportamiento. Por su parte, la probabilidad de falla (o confiabilidad del sistema) recoge los valores promedio junto su variación estándar de los parámetros del suelo, logrando mostrar el nivel de confianza que se tiene en la totalidad del sistema, producto de una incertidumbre acumulada.

El Cuerpo de ingenieros del Ejército de los Estados Unidos cuenta con recomendaciones del nivel de desempeño esperado de terraplenes respecto a la probabilidad de comportamiento no satisfactorio (en la que está incluida la falla) de obras tales como terraplenes y rellenos antrópicos. En la siguiente tabla se presentan las probabilidades calculadas para comportamientos no satisfactorios de las obras, evidenciando que una obra que se encuentre diseñada de acuerdo con las prácticas de ingeniería actual debe tener una probabilidad de presentar inconvenientes iguales o inferiores al 0,1 %. Para proyectos que contemplen la construcción de nueva infraestructura, se debería alcanzar como mínimo este nivel de desempeño.



Nivel de desempeño esperado	Probabilidad de comportamiento no satisfactorio
Alto	0,0000003
Bueno	0,00003
Mejor que el promedio	0,001
Peor que el promedio	0,006
Malo	0,023
No satisfactorio	0,07
Riesgoso	0,16

Tabla 15. PROBABILIDAD DE COMPORTAMIENTO NO SATISFACTORIO DE ACUERDO AL NIVEL DE COMPORTAMIENTO ESPERADO EN LAS OBRAS GEOTÉCNICAS.

FUENTE: U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1997)[234]

La licuación es un movimiento en masa donde un material que tiende a reducir su volumen ante un incremento de carga[235] genera unos incrementos en la presión de poros tal que genera una perdida en la resistencia del suelo por la reducción del esfuerzo efectivo del suelo, así como el módulo de corte (Towhata, 2008[236]). Cuando esto ocurre, el material se "fluidifica[237]" por un periodo de tiempo corto, perdiendo su capacidad de soporte y autosoporte. Este proceso que comúnmente se le asocia a materiales cuyos poros se encuentran llenos de agua[238], también es posible que suceda cuando el material se encuentra en condición de saturación parcial[239] (Yoshimi et al., 1989[240]). La licuación se puede producir de manera dinámica (por acción sísmica) o estática, cuando se generen incrementos en los procesos de carga de un material.

No es posible detectar con anterioridad la licuación estática, aún con instrumentos de medición avanzados, debido a la velocidad a la que esta se presenta. Sin embargo, es necesario contar con planes de monitoreo que permitan evidenciar comportamientos anómalos y distintos a los estipulados en los diseños.

Es importante resaltar que las obras civiles requieren en su totalidad de un plan de instrumentación y monitoreo que permita hacer el seguimiento a su comportamiento durante toda su vida útil. En geotecnia, a diferencia de otras especialidades, los planes de instrumentación y monitoreo buscan adicionalmente hacer un seguimiento a la incertidumbre asociada a cualquier modelo geológico-geotécnico en su variación espacio-tiempo y a la validez de los supuestos y predicciones realizadas en comparación con la realidad en el terreno de forma tal que se puedan hacer modificaciones en los diseños iniciales para mejorar el desempeño futuro de las obras.

[234] U.S. Army Corps of Engineers. (1997). Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering. Technical Letter No. 1110-2-547.

[235] Material contractil

[236] Towhata, I. (2008). Geotechnical Earthquake Engineering. Springer. Verlag Berlin Heidelberg.

[237] Se comporta como un fluido y no como un sólido.

[238] Materiales saturados.

[239] Materiales en los cuales no todos los espacios están llenos de agua.

[240] Yoshimi, Y., Yanaka, K., & Tokimatsu, H. (1989). Liquefaction resistance of a partially saturated sand. Soils and foundations 29(3). 157-162.



Para la generación del plan de instrumentación y monitoreo se debe, en primer lugar, determinar las amenazas y modos de falla que se pueden presentar en el proyecto. Posteriormente, se debe realizar un análisis de la probabilidad de ocurrencia de cada una de las amenazas determinadas, junto con sus consecuencias asociadas. Una vez realizado este análisis, se debe plantear un plan de monitoreo con el que se pueda reducir la probabilidad de las fallas identificadas en el análisis de riesgos (Allen, 2007[241]). Lo anterior, entendiendo que la instrumentación en geotecnia no evita los daños causados, sino que es la herramienta en la cual se basa la gestión del riesgo.

La identificación de las amenazas y modos de falla en geotecnia se realizan durante las distintas fases de los proyectos, apoyados en todo momento de un proceso de monitoreo continuo:

- Durante la fase de diseño, el monitoreo permite realizar la caracterización continua de las condiciones en sitio, particularmente de las presiones y flujos de agua subsuperficiales, que deberán ser involucradas en los diseños finales del proyecto.
- Durante la etapa de construcción el monitoreo se realiza como un control de seguridad, permitiendo contar con un sistema de alarma temprana frente a situaciones que no hubieran sido consideradas durante el diseño, y como un control del desarrollo técnico de la obra en velocidad de ejecución de los rellenos, en la idoneidad de los soportes de obras subterráneas, etc.
- En la etapa posterior a la construcción la implementación de un sistema de monitoreo constituye la comprobación de los diseños planteados, el manejo y control operativo de una obra específica (en el caso de proyectos hidroeléctricos y mineros), la detección oportuna de situaciones anómalas que puedan afectar el funcionamiento de las estructuras, y la comprobación de la seguridad de la obra y del entorno en el que se encuentra (Allen, 2007).

El plan de monitoreo debe incluir: los parámetros a ser monitoreados, el rango y resolución de los valores esperados y requeridos en cada parámetro, la selección de los instrumentos a instalar, la ubicación de los instrumentos de acuerdo con las hipótesis de amenaza y probabilidades de falla encontradas, el plan de recolección de datos (formatos, programación, criterios, etc.), y el plan de mantenimiento. Lo anterior, junto con los planes de intervención y contingencia dependiendo de los niveles de amenaza que se van dando.

La duración de los planes de monitoreo debe contemplar la posibilidad de que se presenten eventos naturales (sismos o lluvias) o antrópicos que podrían modificar las condiciones generales de estabilidad y para los cuales se debería contar con planes de monitoreo especial, sin importar el momento en que estos ocurren.

---

241 Allen, Q. (2007). Why Monitor Performance? FMGM 2007: Seventh International Symposium on field Measurements in Geomechanics.



5.2 Revisión del Estudio de impacto ambiental

En esta sección se presentan las observaciones relacionadas con la estabilidad geotécnica de las obras a construir en el proyecto. Las observaciones realizadas, se dividen en los distintos aspectos requeridos para la ejecución de estudios geotécnicos, tales como la caracterización de los materiales, el análisis de solicitaciones a las cuales se verán sometidas las estructuras, las consideraciones particulares de diseño propuestas para las obras superficiales, la zona de subsidencia y para los túneles, el plan de manejo ambiental, el plan de manejo de riesgo y el plan de cierre y el plan de monitoreo.

La implantación del proyecto se encuentra en zonas caracterizadas como estables a medianamente estables. Si bien se presenta un mapa de estabilidad geomorfológica, del que se toma un extracto en la Figura 94, la huella del proyecto en superficie no permite identificar los límites de las distintas categorías, o la posible existencia de zonas de mayor inestabilidad bajo las estructuras proyectadas. A pesar de esto, se logra identificar que el depósito de relaves se encuentra sobre una zona categorizada con riesgo físico Medio Alto, el cual corresponde con el color naranja de la zonificación presentada.

La delimitación de las zonas de estabilidad geomorfológica, al parecer no incluyó un inventario de movimientos en masa de la zona mediante la interpretación de fotografías antiguas ni mediante el análisis de las principales características actuales del terreno. La identificación de procesos antiguos hace parte esencial en la identificación de zonas inestables, ya que, los materiales que han sido movilizados por un movimiento en masa anterior se encuentran en una condición metaestable[242] en la que pequeñas variaciones pueden ocasionar su reactivación.

[242] Corresponde con una condición en la cual los materiales se encuentran aparentemente estables, pero dicha situación corresponde a un equilibrio que puede ser alterado fácilmente por cambios mínimos en el entorno, haciendo que se presenten fallas locales o generalizadas.



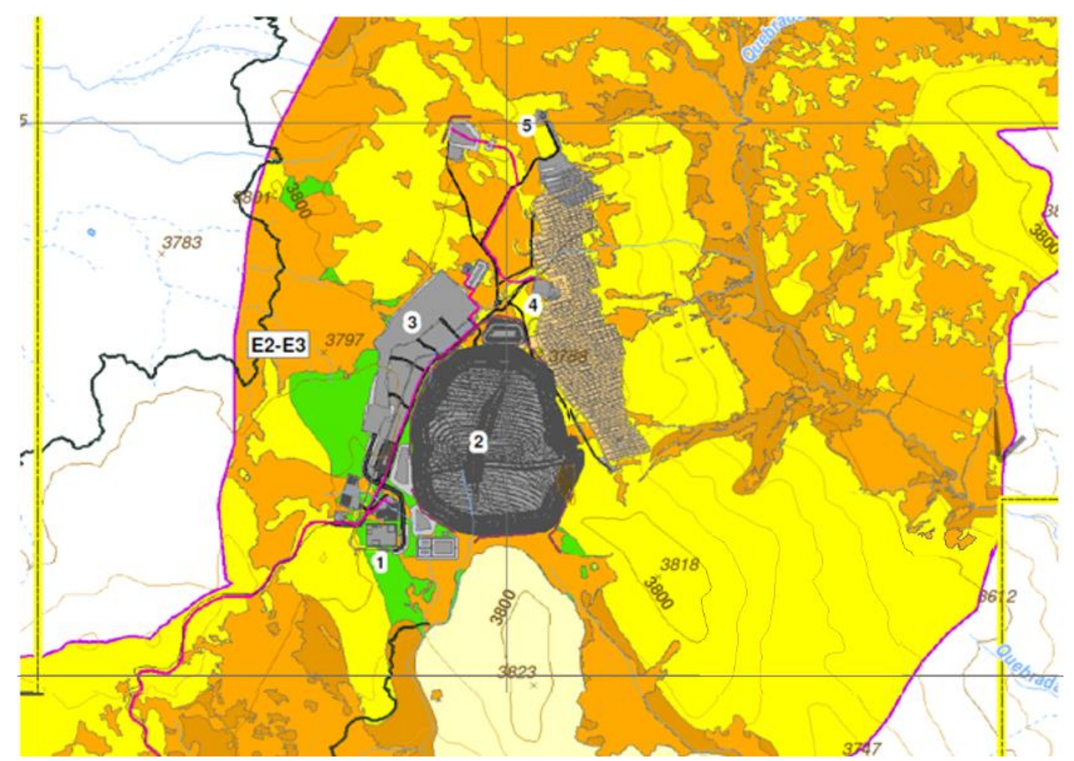


FIGURA 94. MAPA DE ESTABILIDAD GEOMORFOLÓGICA. FUENTE: INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021)

5.2.1 Caracterización de materiales y del perfil geológico geotécnico

El proyecto se encuentra implantado sobre rocas volcánicas y flujos de lava andesítica, parcialmente cubiertos por depósitos aluviales, morrenas glaciales y depósitos lacustres. Si bien se trata de un proyecto de minería subterránea, en el cual se contará con una longitud considerable de túneles y galerías para la extracción de mineral, la caracterización desde el punto de vista geotécnico es muy pobre y se basa principalmente en estimaciones cualitativas de los profesionales que realizan los estudio, y no en mediciones reales y tangibles de las propiedades de los materiales.

A continuación, se presentan las principales falencias que se detectaron en el EsIA relacionada con la correcta identificación y caracterización del perfil geológico geotécnico sobre el que se piensa implantar el proyecto, así como de los materiales que se emplearían en su construcción.

5.2.1.1 Materiales de fundación

Para el EsIA se realizaron 35 pozos de ensayo en el sitio de la planta de procesamiento, y se indica que se llevaron las muestras para su caracterización en el laboratorio. De dichos pozos, no se presentan las profundidades máximas alcanzadas ni los métodos empleados durante la exploración, haciendo imposible el seguimiento de la información obtenida. Adicionalmente, aclaran que *"Durante el diseño detallado de las instalaciones, se complementarán las investigaciones complementarias."*[243], dejando claro que no se adelantó la totalidad de la exploración requerida para poder garantizar la seguridad del proyecto, y para el cálculo de los riesgos asociados a su falla. Esto es particularmente crítico, ya que las instalaciones manejarán residuos tóxicos en su interior, e

---

[243] Página 6-195 del EsIA

incluirán la construcción de una relavera en materiales de los cuales desconocen parte de su comportamiento mecánico.

El perfil de suelo determinado incluye una capa orgánica de un espesor promedio de 1 m, seguido de un estrato de suelo residual (del que no especifica si corresponde a algún horizonte de meteorización en particular) que puede ser de varios metros de espesor (no especifican cuantos). El espesor de los suelos residuales es una información crítica para entender la eventual inestabilidad de un proyecto que implica obras en superficie, pues pueden ser completamente arcillosos y muy sensibles en su comportamiento al contenido de agua. Posteriormente, se encuentran varios tipos de roca, entre las que se destaca la dacita en la parte sur del proyecto, y lava andesítica y morrena en la parte norte. Respecto a la capacidad de resistir sobrecargas de estos materiales, el EsIA indica:

> *"Basados en la observación visual de los pozos de ensayo, los materiales de la roca tienen la consistencia y la resistencia que van desde arcilla rígida media a roca blanda competente, dependiendo del grado de meteorización."*

Queda en evidencia que no existe por parte de la empresa minera una cuantificación de las propiedades de la roca, y que sus aseveraciones respecto a la resistencia y consistencia de dichos materiales se basa únicamente en la observación visual de los pozos de ensayo; existe una falencia total en la identificación del comportamiento esperado en los diferentes horizontes de meteorización que se encuentran en la zona de implantación del proyecto, desconociendo así la posibilidad de falla o los tipos de inestabilidades desde el punto de vista geotécnico que se pueden presentar en las obras que se construirán en superficie.

En el caso de los proyectos que involucran obras subterráneas, como es el caso de la mina planteada, cobra gran importancia el conocimiento a detalle que se tiene del sistema de discontinuidades, requiriendo contar con datos de dirección, persistencia, abertura, relleno, rugosidad, forma y condiciones de agua. No se encuentra ningún registro de estos datos para las perforaciones realizadas, impidiendo así contar con un perfil geológico – geotécnico que responda a las necesidades mínimas del planteamiento del proyecto.

La práctica común en proyectos de minería es presentar perfiles estratigráficos que den indicios de la calidad del macizo rocoso mostrando valores (por ejemplo) de que tan espaciadas están las discontinuidades unas de otras mediante algún índice. En las figuras siguientes se muestra a modo de ejemplo la forma en que se suelen presentar de forma espacializada y comparativa entre diferentes sitios, la variación de parámetros que hablan de la calidad del macizo rocoso y de su comportamiento esperado. A pesar de ser común la inclusión de este tipo de información por parte de las empresas mineras, el EsIA presentado no muestra ninguna información relacionada con la distribución espacial de las fracturas, impidiendo así conocer el comportamiento mecánico e hidrogeológico del macizo rocoso; no se cuenta con ningún tipo de soporte que sustente las apreciaciones de los autores del EsIA en cuanto a la estabilidad de los túneles, galerías, subsidencia o abatimientos de nivel freático.



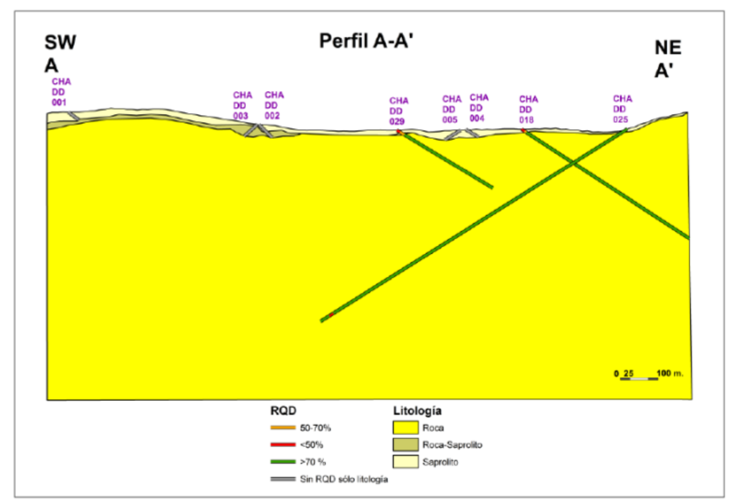


FIGURA 95. PERFIL GEOLÓGICO CON VALORES DE RQD ESPACIALIZADOS DEL PROYECTO MINERO QUEBRADONA EN COLOMBIA, FUENTE: ESIA MINERA DE COBRE QUEBRADONA S.A.

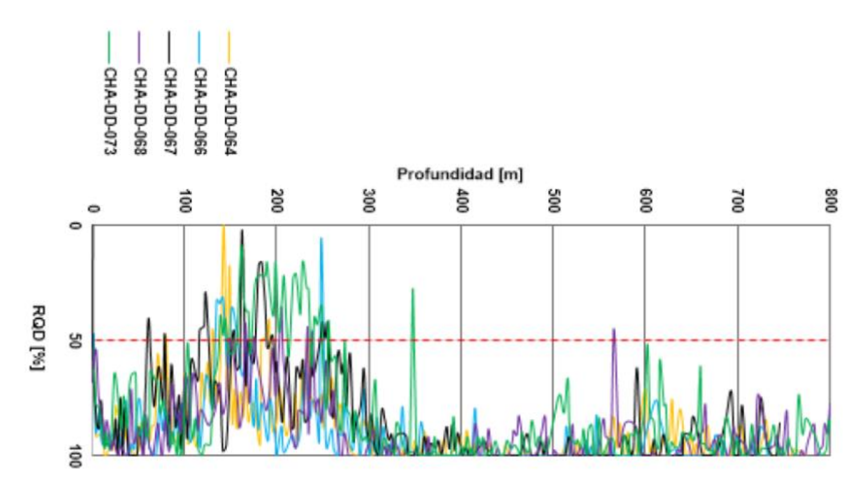


FIGURA 96. VALORES DE RQD PARA DIFERENTES PERFORACIONES DEL PROYECTO MINERO QUEBRADONA EN COLOMBIA, FUENTE: ESIA MINERA DE COBRE QUEBRADONA S.A.

Para el caso de estructuras en superficie, como lo son los depósitos de relaves y las instalaciones requeridas para el proceso de extracción de los minerales, se tienen recomendaciones de carácter básico pero fundamentales que buscan garantizar la estabilidad de las obras. Según dichas recomendaciones:

> *"Las empresas operadoras deben presentar una evaluación detallada de la ingeniería de los cimientos de la presa, y una caracterización física y química de las propiedades del material de relaves, con atención especial al contenido de arcillas y su potencial de licuefacción[244]."[245]*

[244] El proceso de licuefacción o licuación se explica en mayor detalle más adelante en este capítulo.

[245] Morrill, J., et al. (2020). Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management, Earthworks and MiningWatch Canada.



No existen ensayos de caracterización de los materiales que permitan determinar la magnitud de la sobrecarga que se puede colocar de forma segura, ni se especifica la posibilidad de encontrar diferentes horizontes de meteorización con sus diferencias en capacidad portante. No se realiza, en ningún momento, un análisis de los materiales que van a servir de fundación para las estructuras de procesamiento de la planta y de los depósitos de acopio de material, incluyendo la relavera.

El desconocimiento del comportamiento de los materiales de fundación puede llevar al colapso parcial o total de la infraestructura que se planea construir para la operación y explotación del proyecto minero. Teniendo en cuenta que se requiere el almacenamiento de químicos de carácter tóxico, de explosivos y de desechos nocivos para la salud humana y para el ambiente en la parte alta de la cuenca, se podría llegar a presentar una rápida contaminación del sistema hídrico con afectaciones irreversibles al componente biótico. El proyecto no presenta una valoración ante la posibilidad de ocurrencia de este tipo de eventos, desconociendo así el daño que se podría causar en caso de presentarse alguna falla, sea bien durante la etapa de explotación o en la etapa de cierre y postcierre.

5.2.1.2 Materiales de construcción

No se tiene claridad del uso de materiales de excavación como material de construcción en el proyecto, ni se cuenta con información de fuentes de materiales que puedan suministrar a la mina la cantidad requerida para la correcta construcción del proyecto. Esto queda en evidencia en la sección de Recomendaciones para las Fundaciones:

> *"En la actualidad o se ha identificado ninguna fuente de préstamo para el relleno estructural, por lo que el diseño de los cimientos sobre el relleno debe abordarse de manera conservadora."*

Lo anterior, indica que no se tiene claridad del tipo de materiales a emplear, lo que se traduce en un alto nivel de incertidumbre frente a los posibles riesgos asociados. Se debe tener en cuenta que el conocimiento de los materiales de construcción es esencial para garantizar el correcto funcionamiento de las estructuras, en especial cuando se trata de obras masivas como los rellenos; el no contar con materiales adecuados facilitará procesos de inestabilidad al interior de lo construido, generando la posibilidad de fallas que pueden llegar a ser catastróficas tanto desde el punto de vista de la afectación humana, como desde el punto de vista ambiental. Dado que los materiales de construcción se ven involucrados en la totalidad de la infraestructura, incluyendo los distintos depósitos de materiales y las distintas estructuras civiles para el almacenamiento y procesamiento de los minerales, se desprecia por completo el riesgo asociado al colapso de alguno de estos elementos que mantienen en su interior compuestos y desechos tóxicos nocivos para los humanos y para el medio ambiente.

Adicionalmente, indica que no se están teniendo en cuenta los riesgos acumulativos que se pueden generar respecto a la extracción de materiales de construcción y la cantidad de materiales requeridos para la mina. Esto es de especial importancia, ya que desconoce al entorno de la mina como un sistema, y asume que se puede extraer material de forma indiscriminada y con fines constructivos sin tener en cuenta los impactos adicionales que se presentan en este tipo de explotación, en la que se requieren grandes volúmenes y un gran control desde el punto de vista mineralógico para evitar reacciones adversas con los materiales cementantes.



5.2.2 Solicitaciones sísmicas para el diseño

La ubicación del proyecto se encuentra en una zona con fallas activas a 15 km, representando una alta probabilidad de que se presenten sismos a lo largo de la vida útil de las estructuras a construir, incluyendo la relavera. El análisis histórico de los sismos, incluye los sismos de magnitud mayor a 5, dejando por fuera distintos estudios en los que se ha determinado que sismos de magnitud mayor a 4 pueden detonar movimientos en masa tal como fue presentado anteriormente, y dejando de lado los sismos que han sido detectados y caracterizados con sismógrafos (instrumentales).

Según el EsIA, la zona se encuentra en una zona en la que los sismos pueden generar una intensidad de VIII, tal como se muestra en la Figura 98. La intensidad corresponde con una escala cualitativa en la que se presentarán una serie y tipología de daños. A sismos de mayores magnitudes, se esperan mayores afectaciones en las viviendas, estructuras y construcciones en general. La escala de intensidad de Mercalli es la más empleada a nivel mundial, y considera los siguientes daños para una intensidad VIII como la indicada en el EsIA:

> *"Daños ligeros en estructuras de diseño especialmente bueno; considerable en edificios ordinarios con derrumbe parcial; grande en estructuras débilmente construidas. Los muros salen de sus armaduras. Caída de chimeneas, pilas de productos en los almacenes de las fábricas, columnas, monumentos y muros. Los muebles pesados se vuelcan. Arena y lodo proyectados en pequeñas cantidades. Cambio en el nivel del agua de los pozos. Pérdida de control en las personas que guían carros de motor."*[246]

Teniendo en cuenta la intensidad esperada en la zona del proyecto, los proyectos que se realicen en dicha área deben considerar las alteraciones al entorno producto del sismo, así como las solicitaciones a las cuales se verán sometidas las obras civiles a construir. No es coherente este análisis con lo indicado en la sección 12.3.1.1 del EsIA, en donde se indica que:

> *"De acuerdo a este análisis, la región del área de estudio corresponde a una zona con riesgo sísmico determinado como riesgo IRRELEVANTE (…)"*[247]

Adicionalmente, en la Figura 97 se presentan los sismos alrededor del área de interés, clasificados según la magnitud registrada. Esta gráfica incluye únicamente los sismos entre el 2012 y enero del 2020. Se puede observar que cerca al proyecto minero se cuenta con registros recientes de sismos con magnitudes incluso superiores a 6,0 por lo que los análisis de estabilidad deben incluir efectos de fuente cercana que afecten las estructuras a construir. Sin embargo, no se incluyen los sismos registrados antes de 2012, ni los sismos históricos; el catálogo total de sismos, incluye para la zona de interés sismos desde 1556.

---

246 SGM (2017). Escalas de sismos. Servicio Geológico Mexicano. Consulta en línea: https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/Escalas-sismos.html

247 Página 12-12 del EsIA.



FIGURA 97. MAPA DE MAGNITUD SÍSMICA PRESENTADO EN EL ESIA. FUENTE: PLANO 6.1-5 DEL ESIA INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021).



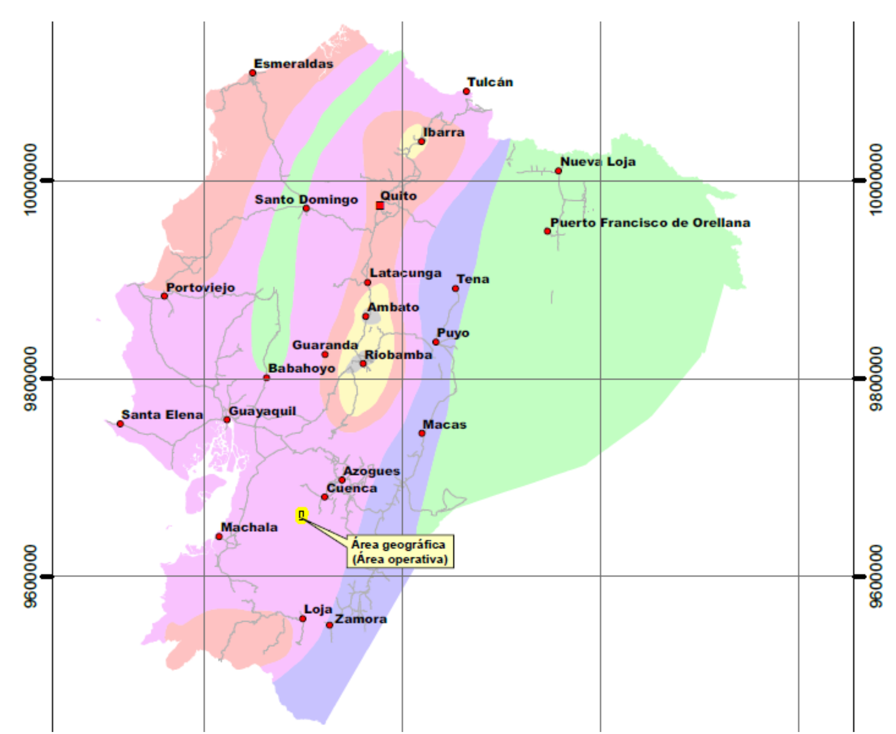


FIGURA 98. MAPA DE INTENSIDAD SÍSMICA PRESENTADO EN EL EsIA. FUENTE: PLANO 6.1-5 DEL EsIA INV METALS - CARDNO ENTRIX (2021).

Si bien se habla en el documento que se trata de una zona sísmicamente activa, en el análisis de riesgos determinan que se cuenta con un riesgo sísmico irrelevante, contrario a lo que se presenta en el mapa de intensidades y en el mapa de magnitudes. Aclaran, que los eventos sísmicos presentarán "*consecuencias puntuales, que se pueden producir una o más veces a lo largo de 10 años.*" La evaluación realizada para la obtención de la licencia ambiental pone en evidencia que no se estudiaron posibles eventos acumulativos o fallas progresivas de los materiales debido a la degradación de las propiedades mecánicas de los suelos y relaves.

El no considerar de forma correcta las solicitaciones sísmicas para el diseño de las estructuras y de los depósitos al interior del proyecto minero, puede generar el colapso de la totalidad de lo construido en caso de que se llegue a presentar un sismo de magnitud importante, como es posible en una zona sísmicamente activa; el colapso de la infraestructura del proyecto minero se podría presentar de forma simultánea en todas las instalaciones, liberando agentes contaminantes y tóxicos al sistema sin contar con ningún protocolo de atención o plan de contingencia. En el capítulo anterior se analizó de forma específica las consecuencias de la falla del depósito de relaves.

Uno de los aspectos que se suelen ignorar de forma errónea en los EsIA es la evaluación de los efectos de las vibraciones inducidas por la maquinaria y por el transporte desde el interior de la mina hasta su destino final, que para este proyecto corresponde la zona portuaria. Para el caso de Loma Larga, no se incluyó ninguna valoración, caracterización o identificación de los riesgos asociados a las vibraciones que generará el proyecto no solo en la zona cercana, sino a lo largo del trayecto de transporte.



El estudio únicamente incluye como zona de influencia directa el transporte hasta San Gerardo, que se encuentra a 17,44 km de la mina; no obstante, no evalúan los posibles daños a las casas y estructuras cercanas a la vía, posiblemente no fueron construidas con el objetivo de soportar el tráfico de vehículos de más de 60 toneladas. Las viviendas que se encuentran en este corredor vial se pueden llegar a ver seriamente afectadas, reduciendo inicialmente su funcionalidad, pero llegando a incluso a comprometer su integridad estructural y poniendo en riesgo su estabilidad general; las continuas vibraciones generadas por el tráfico pesado de viviendas que no fueron construidas para dichas solicitaciones, pueden generar daños sociales incuantificables e incluso llevar al colapso parcial de las estructuras.

5.2.3 Acopio de materiales

Al interior del proyecto se contará con distintos sitios de acopio de materiales. Uno de ellos es el depósito de roca estéril, contemplado para almacenar material extraído de las excavaciones subterráneas durante toda la vida útil de la mina. El depósito tiene una capacidad de 50 000 m^3, una altura de aproximadamente 10 m y unos taludes 2H:1V. Esta configuración propuesta para la pila de estériles fue obtenida sin ningún tipo de caracterización de los materiales y sin tener claridad de la cantidad de volumen de almacenamiento requerido, tal como se muestra a continuación.

De esta pila de almacenamiento, se indica que se realizará una reconfiguración del material "*hasta alcanzar una configuración estable"*[248]*.* No se especifica en ningún momento como es dicha configuración y como es que durante la fase operativa no se contaría con una configuración estable para el depósito, dejando de lado los riesgos asociados a su falla. Adicionalmente, la sección 7.2.2.1 indica que *"(…) el tamaño de la pila de almacenamiento se reducirá cuando la roca estéril sea usada, y al final de la vida útil de la mina se habrá utilizado toda la roca estéril y no habrá roca estéril restante para rehabilitar*". Esta afirmación contradice lo indicado para la etapa de cierre, evidenciando una incoherencia al interior del EsIA y que no hay claridad del volumen de materiales a extraer ni del manejo que se tendrá con estos materiales.

5.2.4 Túneles y obras subterráneas

Los principales aspectos para considerar en la estabilidad de túneles y obras subterráneas en general son[249]:

- Geológicos: condiciones de las discontinuidades, zonas de mayor debilidad y grado de alteración de los materiales por meteorización. Se debe tener en cuenta de forma detallada la orientación desfavorable de las discontinuidades y la orientación de los esfuerzos respecto al eje del túnel.
- Hidrogeológicos: Presiones de poro, fuerzas desestabilizadoras y reducción de la resistencia al corte. Se debe hacer énfasis en flujo a través de las fracturas hacia el interior del túnel y la presencia de acuíferos.
- Geotécnicos: Comportamiento mecánico de los materiales térreos.

---

[248] Sección 7.6.3.9 del EsIA.

[249] SCT (2016). Manual de diseño y construcción de túneles de carretera. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Tècnicos. Estados Unidos Mexicanos.



La evaluación y valoración de dichos factores parte de la correcta exploración y seguimiento de las condiciones del entorno, tomando como premisa la magnitud de la obra a diseñar y las posibles afectaciones que generará la eventual falla de las obras construidas.

La excavación de la rampa de acceso principal incluirá alrededor de 1820 m de longitud equivalente de desarrollo. Con un desarrollo adicional de 1150 m como forma de acceso a los niveles adicionales. Si bien se cuenta con una propuesta de sostenimiento preliminar, esta fue realizada teniendo en cuenta únicamente los sistemas de clasificación general del macizo, sin realizar en ningún momento un mayor análisis de las deformaciones a las que se verán sometidas las galerías, o de la distribución de esfuerzos en una zona con régimen extensional debido a los sistemas de fallas.

Lo anterior es especialmente preocupante cuando el EsIA indica en la Tabla 6-83 Propiedades de la Masa de Roca, que la Dacita, Andesita y Morrena se clasifican como roca débil, roca muy débil y roca extremadamente débil respectivamente, con resistencia a la compresión inconfinada de máximo 5 MPa, 1,3 MPa y 0,75 MPa para cada una, sin que en los documentos disponibles se cuente con ensayos de laboratorio que soporten estas valoraciones. El documento indica que no se cuenta con el diseño minero, especificando:

> *"Esta sección proporciona un resumen de los aspectos de diseño geomecánico que se espera que se completen con el estudio de viabilidad, con el fin de resaltar las consideraciones clave para el diseño."*[250]

> *"Los criterios de diseño de crownpillar dependerán de los componentes de tamaño de rebaje, relleno y del método de diseño subterráneo de la mina. El diseño del pilar corona debe considerar: (…)"*[251]

Lo anterior, deja en claro que no se cuenta con mayor claridad de los materiales que se encontrarán, desde el punto de vista geotécnico, en la zona del pilar corona requerido para la explotación minera. Queda explícito en el documento, que no se tiene claridad de los perfiles de meteorización, las estructuras de falla y la variación espacial del suelo presente. Tampoco se presentan cuáles consideraciones especiales se tendrán que realizar al momento de trabajar en las rocas expansivas que se indica que corresponde con en aquellas alteradas con smithsonita e illita.

De forma adicional, no se tiene conocimiento de la red de flujo que se generará con la excavación de la mina ni la forma en que se las presiones de poros afectarán la estabilidad del macizo durante la construcción, así como en la etapa de cierre o postcierre

Finalmente, el EsIA considera el riesgo por subsidencia de mina y galerías como irrelevante, indicando que es un riesgo probable con consecuencias limitadas. Lo anterior, se afirma en el documento incluso con el total desconocimiento del comportamiento de los materiales que deberán soportar la carga durante la excavación subterránea. el EsIA debería contemplar el peor escenario posible, con el fin de poder contar con los planes de contingencia que deben ser implementados en cado de presentarse dicha situación.

---

[250] Página 6-192 del EsIA.

[251] Página 6-194 del EsIA.

Transversal 15B No. 46 – 16 Of. 506 Tel: 340 24 62 Bogotá D.C., Colombia
info@terraegeoambiental.org



5.2.5 Monitoreo

Tal como se mencionó anteriormente, los proyectos de construcción deben contar con un sistema de monitoreo en sus distintas fases. Sin embargo, en el EsIA únicamente se menciona lo siguiente:

> *"Durante el periodo posterior al cierre, algunas actividades de monitoreo continuarán en el sitio e incluirá:*
> *Mantenimiento anual y monitoreo regular de todos los componentes restantes de la mina.*
> *Monitoreo remoto (cámaras, sensores) donde sea posible.*
> *Inspección de seguridad anuales de la relavera según se requiera."*[252]

Lo anterior pone en evidencia que no se tiene claridad del sistema de monitoreo que se implementará en el proyecto en sus distintas etapas, y que no se ha realizado el diseño requerido para garantizar un seguimiento riguroso que permita reducir la incertidumbre del proyecto, identificando así de forma oportuna los riesgos que se pueden presentar en los distintos componentes.

Quizás el único comentario específico de frecuencia de seguimiento corresponde al relacionado con la relavera:

> *"Investigación detallada de la relavera cada cinco años y después de todos los eventos símicos significativos."*

Sin embargo, no se aclara que es considerado como un evento sísmico significativo, y tampoco se detalla el tipo de "investigación detallada" que se llevará a cabo. No especificar los tipos de auscultación a realizar, así como no detallar los umbrales de alerta que se deben considerar para cada uno de los elementos en seguimiento, hace que no se tenga un plan de manejo adecuado ante algún evento anómalo o ante una falla en el comportamiento esperado de las construcciones.

Finalmente, respecto a la duración del monitoreo en la etapa postcierre se indica:

> *"Se ha asumido que el periodo de tiempo requerido para el monitoreo posterior al cierre es de cinco años, pero el requisito para el monitoreo a más largo plazo dependerá de la eficacia de las actividades de recuperación, incluida la estabilidad de la presa, la calidad del agua y el éxito de la revegetación."*

Al igual que con las afirmaciones anteriores consignadas en el EsIA, no se presentan detalles de cómo se realizarán dichas actividades, cuáles serán los indicadores para determinar las eficacias mencionadas, o cuáles son los planes de acción en caso de no registrar el comportamiento esperado. La falta de claridad frente al monitoreo que mencionan (pero no plantean, esquematizan o diseñan), deja ver el poco respaldo y las pocas acciones de mitigación de emergencia que se tendrían en caso de presentarse la falla de alguno de los elementos del proyecto. Adicionalmente, al no tener claridad en el plan de monitoreo, se tiene un desconocimiento total sobre el momento en el cual se deben activar los planes de contingencia que se deben incluir en los análisis de riesgo que requieren ser abordados por un EsIA.

---

[252] Página 7-164 del EsIA



5.2.6 Evaluación del riesgo

El estudio de impacto ambiental presentado no realiza un análisis completo del riesgo que existirá en caso de construirse el proyecto minero. Un análisis completo, debería incluir:

- Análisis de la amenaza: corresponde con la identificación, caracterización y cuantificación de los elementos que son la fuente del peligro y que representan algún nivel de peligro. Para el caso del proyecto minero, en donde se puede presentar una falla del depósito de relaves, se debería caracterizar como mínimo el volumen máximo de material con posibilidad de falla, el alcance (o distancia de viaje) que se tendría en caso de que se presentara la falla.
- Análisis de la vulnerabilidad: corresponde con la identificación de los elementos que se verían expuestos a la amenaza identificada. Para el evento de falla del depósito de relaves, se debería contar con la caracterización del medio biótico y abiótico que se vería expuesto, incluyendo los daños ambientales irreversibles y las afectaciones al entorno natural en general.
- Análisis del riesgo: corresponde con la evaluación de la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento, que generará un cierto nivel de daños en los elementos expuestos (o vulnerables). Esta etapa únicamente se puede llevar a cabo si se analizaron con anterioridad la amenaza y la vulnerabilidad, ya que de lo contrario se estaría realizando un análisis carente de todo tipo de fundamento.

Para el caso del proyecto minero Loma Larga no se cumplieron los pasos necesarios para hacer una evaluación del riesgo, razón por la cual la valoración presentada en distintos apartados del EsIA (tal como la Tabla 1-32 del documento) no constituye un argumento suficiente para indicar que se cuenta con un riesgo bajo desde el punto de vista geotécnico.

En este mismo sentido, las medidas indicadas en la Tabla 13-19 del EsIA del plan de contingencias que hace parte del "Subplan de gestión de riesgos por colapso de la relavera" no tienen ningún soporte y no mencionan los impactos que se tendrían hacia aguas abajo (no directamente en el proyecto), en el caso que se presentara algún tipo de falla en la relavera, incluyendo la licuación de los materiales almacenados; una evaluación adecuada de este riesgo, debería incluir dentro del plan de contingencia las actividades a realizar a lo largo del área de transporte del flujo generado, involucrando el medio ambiente y las comunidades que se verían afectadas.

5.3 Conclusiones

El componente geotécnico del Estudio de Impacto Ambiental es aparentemente cualitativo, basado en apreciaciones y juzgamiento de expertos. No se identificaron en los documentos consultados los soportes que se requieren para dar las afirmaciones realizadas respecto a la estabilidad de las obras a construir, dentro de las que se deben destacar por su importancia la relavera y los túneles de explotación subterránea.

Al no lograr identificar elementos cuantitativos que permitan generar una trazabilidad sobre los factores involucrados en la evaluación del riesgo geotécnico del proyecto, se incluye un alto nivel de incertidumbre sobre el comportamiento que tendrán a corto, mediano y largo plazo las obras construidas.



6. BIBLIOGRAFÍA

Adomako, E., Deacon, C., & Meharg, A. (2010). Varitions in concentrations of arsenic and other potentiallty toxic elements in mine and paddy soils and irrigation waters from Southern Ghana. Water Quality Expo Health, 10 (29), 115-124

Allen, Q. (2007). Why Monitor Performance? FMGM 2007: Seventh International Symposium on field Measurements in Geomechanics.

Alonso, D; Pérez, R, Okio, C; y Castillo, E. (2019). Assessment of mining activity on arsenic contamination in surface water and sediments in southwestern area of Santurbán páramo, Colombia. Journal of Environmental Management No. 264Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport.

Ángel Huerta, A. (2012). Análisis y modelamiento del comportamiento de fluidos líquidos de pilas de escombros en minería de oro. Tesis de Pregrado - Geología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Appleyard, S., Wong, S., Willis-Jones, B., Angeloni, J & Watkins, R. (2004). Groundwater acidification caused by urban development in Perth, Western Australia: source, distribution, and implications for management. Australian Journal of Soil Research, 2004, 42, 579–585

Basu, D., Misra, A., & Puppala, A.J. (2015). Sustainability and geotechnical engineering: perspectives and review. Canadian Geotechnical Journal (52), pp 96-113. dx.doi.org/10.1139/cgj-2013-0120

Beltrán-Rodríguez, L., Larrahondo, J., & Cobos, D. (2018). Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, 44, 5-20.

Beven, K. J. (2011). Rainfall-runoff modelling: the primer. John Wiley & Sons.

Bommer, J.J., Rodríguez, C.E. (2022). Earthquake-induced landslides in Central America. Engineering Geology, Vol 63, pp 189-220.

Bradbury, K. R., & Muldoon, M. A. (1990). Hydraulic conductivity determinations in unlithified glacial and fluvial materials (pp. 138-151). ASTM International.

Brassington, R. (2007). Field hydrogeology. John Wiley & Sons.

British Geological Survey & Department of Public Health Engineering (2001) Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh. Kinniburgh, D & Smedley, P (Editors) Volume 2: Final report. British Geological Survey Report WC/00/19

Burland, J.B. (2012). The geotechnical triangle. En ICE Manual of Geotechnical Engineering, Capítulo 4, pp 17-26

Buytaert, W., Célleri, R., Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006a). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. Earth-Science Reviews, 79(1–2), 53–72. https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2006.06.002

Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2006b). Analysis of the Water Balance of Small Páramo Catchments in South Ecuador. Environmental Role of Wetlands in Headwaters, 63, 271–281. https://doi.org/10.1007/1-4020-4228-0_24



Buytaert, W., Iñiguez, V., & De Bièvre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. Forest Ecology and Management, 251(1–2), 22–30. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2007.06.035

Buytaert, Wouter, Jozef Deckers y Guido Wyseure.2007. “Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use.” Catena 70(2):143–154.

Camprubí, A; González-Partida, E; Levresse, G; Tritlla, J & Carrilo-Chávez, A (2003) Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Tomo LVI, No. 1, 2003, págs. 10-18.

Chandra et al (2019). Large Scale Mapping of Fractures and Groundwater Pathways in Crystalline Hardrock By AEM. Nature

Clark, I. (2015). Groundwater geochemistry and isotopes. CRC press.

Chebotarev, I. I. (1955). Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. Geochim. Cosmochim. Acta, 8, pp. 22-48, 137-170, 198-212.

Chuncho, C & Chuncho, G (2019) Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. Bosques Latitud Cero Vol. 9 (2). Págs. 71-83

Clark, I. (2015). Groundwater geochemistry and isotopes. CRC press.

Crespo P et al, 2014. Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. En: Cuesta F, Sevink J, Llambí LD, De Bièvre B, Posner J, Editores. Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos, CONDESAN. Pag 298

Correa, A., Ochoa-Tocachi, B. F., Birkel, C., Ochoa-Sánchez, A., Zogheib, C., Tovar, C., & Buytaert, W. (2020). A concerted research effort to advance the hydrological understanding of tropical páramos. Hydrological Processes, 34(24), 4609-4627.

Cuervo, V., Burge, L., Beaugrand, H., Hendershot, M., & Evans, S. (2017). Downstream Geomorphic Response of the 2014 Mount Polley Tailings Dam Failure, British Columbia. Fourth World landslide Forum, (págs. 281-289). Ljubljana.

Cuida López, E. (2014). Caracterización mineralógica y geoquímica de lodolitas oscuras de las formaciones Une y Chipaque en la cuenca del Río Chuza, Páramo de Chingaza. Trabajo de grado Geología. Universidad Nacional de Colombia.

Davis, J. (2012). Ground Exploration. En ICE Manual of Geotechnical Engineering, Capítulo 46, pp 619-627

Delleur, J. W. (2006). The handbook of groundwater engineering. CRC press

Dimitrova, R., & Yanful, E. (2012). Factors affecting the shear strength of mine tailings/clay mixtures with varying clay content and clay mineralogy. Engineering Geology, 125, 11-25.

Dold, B. (2014). Evolution of Acid Mine Drainage formation in sulphidic mine tailings. Journal Minerals No. 4, 621 -641. Suiza.

Eckenfelder, W. W. (2000). Industrial Water Pollution Control. Tercera Edición. Pág. 105



Farfán-Duran (2016). Impacto del cambio climático en los caudales de una cuenca de páramo.Primera aproximación. Universidad de Cuenca. Tesis para optar por el título de ingeniero Civil.

Fetter, C. W. (2018). Applied hydrogeology. Waveland Press.

Fierro, J. (2012). Una aproximación sintética sobre impactos ambientales de la minería no legal. En Contraloría General de la República. Minería en Colombia. Institucionalidad y territorio, paradojas y conflictos, Vol 2. Bogotá.

Fierro Morales, J. (2016). Caracterización geoambiental de la cuenca del río La Playa (páramo de Chingaza) y evaluación de la influencia del cambio climático en aspectos de calidad y cantidad de agua disponible para el geosistema – Fase I. Empresa de Acueducto de Bogotá.

Fierro, J. (11 de febrero de 2019). Los desechos de la minería y las presas de relave: una bomba de tiempo. Razon Pública. Obtenido de https://razonpublica.com/

Fierro, J. & López, R. (2014). Aportes a la conceptualización del daño ambiental y del pasivo ambiental por minería. En Minería en Colombia. Daños ecológicos y socio-económicos y consideraciones sobre un modelo minero alternativo, Vol 3. Bogotá: Contraloría General de la República.

Fitts, C. R. (2002). Groundwater science. Elsevier.

Follin et al. (2007). Hydrogeological characterisation and modelling of deformation zones and fracture domains, Forsmark modelling stage 2.2. SKB Rapport R-07-48

Fourie, A. (2015). No more tailings dams! Are these realistic alternatives? . Tailings 2015. Santiago de Chile.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice-hall.

Gaviria, S., Sánchez, M., & Tangarife, A. (2013). Caracterización litológica e hidrogeoquímica en la Cuenca del río Chuza, Páramo de Chingaza. En E. d. Bogotá, Páramos colombianos frente al Cambio Climático: calidad y sostenibilidad de suelos y agua potable para Bogotá. Bogotá.

Gelhar, L. W. (1993). Stochastic subsurface hydrology. Prentice-Hall.

Gill, R. (2015), Chemical fundaments of Geology and Environmental Geoscience. Tercera edición. Wiley Blackwell

Golder (2013). Experiencias de Operación de Depósitos de Relaves Espesados y Filtrados. Lara, J. L.

Guzmán, P., Batelaan, O., Huysmans, M., & Wyseure, G. (2015). Comparative analysis of baseflow characteristics of two Andean catchments, Ecuador. Hydrological Processes, 29(14), 3051–3064. https://doi.org/10.1002/hyp.10422

Hancox, G.T., Perrin, N.D., Dellow, G.D. (2002) Recent studies of historical earthquake-induced landsliding, ground damage, and intensity in New Zealand. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 35 No. 2, pp59-95



Hatje, V., Pedreira, R., De Rezende, C., França , A., De Souza, G., Marin, D., & Hackspacher, P. (2017). The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. Scientific Reports, 7(1), 1-13.

Healy, R. W. (2010). Estimating groundwater recharge. Cambridge university press.

Heidel C & Tichomirowa, M. (2011). The isotopic composition of sulfate from anaerobic and low oxygen pyrite oxidation experiments with ferric iron — New insights into oxidation mechanisms. Chemical Geology Vol. 281. Pág 305-316

Hierro, A; Olías, M; Cánovas, C.R; Martín, J.E; Bolívar, J.P. (2014). Trace metal partitioning over tidal cycle in an estuary affected by acid mine drainage (Tinto estuary, SW Spain). Revista Science of the Total Environment.

Hofstede, R. G. M. 1995. Effects of burning and grazing on a Colombian páramo ecosystem. Ph.D. thesis. Universiteit van Amsterdam. Ámsterdam.

Hofstede, R.; Segarra, P.; Mena, P. V: 2003. Los Páramos del Mundo. Global Peatland Initiative/NCIUCN/EcoCiencia, Quito.

Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., & Cerra, M. (2014). Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo. UICN, Quito: Ecuador.

Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. Transactions, 13(1), 350 - 361.

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of America. (56), 275 - 370.

Hölting, B., & Coldewey, W. G. (2019). Hydrogeology (pp. 33-37). Springer.

Ibañez, T. & Velásquez, L. (2013). Lixiviación de calcopirita en medios clorurados. Revista de Metalurgia. Centro Internacional de Investigaciones Metalúrgicas.

ICOLD. (2001). Tailings dams risk of dangerous ocurrences: lessons learnt from practical experiences, Bulletin 121. París.

Industriall global union. (2019). Lo que se debe saber sobre las represas de relave. Obtenido de https://www.industriall-union.org/es/lo-que-se-debe-saber-sobre-las-represas-de-relave

Instituto de Investigación Geológico y Energético – IIGE (2018) Hoja Geológica Girón. Escala 1:100.000

INVIAS (2015). Manual para diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera

Jibson, R.W., & Harp, E.L.. (2012). Extraordinary distance limits of landslides triggered by the 2011 Mineral, Virginia, earthquake

Keefer, D.K. (1984). Landslides caused by earthquakes.

Keefer, D.K. (2002). Investigating landslides caused by earthquake – A historical review. Surveys in Geophysics 23: 473-510.



Kuipers, J.R., Maest, A.S., MacHardy, K.A., and Lawson, G. (2006). Comparison of Predicted and Actual Water Quality at Hardrock Mines: The reliability of predictions in Environmental Impact Statements.

Langmuir, D., Chrostowski, P., Vigneault, B. & Chaney, R. (2005). Issue paper on the environmental chemistry of metals. Submitted to: U.S. Environmental Protection AgencyRisk Assessment Forum.

Lattanzi, P; Da Pelo, S; Musu, E; Atzei, D; Elsener, B; Fantauzzi, M & Rossi, A (2008). Enargite oxidation: A review. Earth-Science Reviews 86. Págs 62–88

Li, A., Beek, T. aus der, Schubert, M., Yu, Z., Schiedek, T., & Schüth, C. (2019). Sedimentary archive of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and perylene sources in the northern part of Taihu Lake, China. Environmental Pollution, 246, 198–206. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.112

Lillo, J (s.f.) Peligro geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas. GEMM - Grupo de Estudios de Minería y Medioambiente.

Llambí, L., Bièvre, B., Célleri, R., Ochoa, B., Borja, P., & Soto, A. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos.

MacDonald, P.J., Bissig, T., Hart, C.J.R., Barreno, J., Viera, F., Mantilla, G., and Rogers, J. (2012). Evolución hidrotermal de la Falla Río Falso, Distrito Au-Ag-Cu de Alta Sulfidación de Quimsacocha, Provincia de Azuay, Ecuador. Presentado a la conferencia SEG, Lima, Perú, septiembre de 2012.

Maest, A; Prucha, R and Cobus, C. (2020) Hydrologic and Water Quality Modeling of the Pebble Mine Project Pit Lake and Downstream Environment after Mine Closure. Minerals 2020, 10, 727

Martínez-Moscoso, A., Alarcón P (2021) Tutela de los derechos de la Naturaleza y el ambiente sano, Colegio de Jurisprudencia, Universidad San Francisco de Quito.

Mead, D. W. (1919). Hydrology: the fundamental basis of hydraulic engineering. McGraw-Hill Book Company.

Menadier, M (2009). Biolixiviacion de piritas por Acidithiobacillus ferrooxidans y cepas nativas. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil en Biotecnología. Universidad de Chile

Ministerio de Energía y Minas (2005). Mapa Geológico de Girón – Escala 1:100.000. Supervisión Geológica. Unidades de Cartografía y Recursos Minerales.

Ministerio de Minas y Energía Colombia & ATG. (2021). Propuesta de Lineamientos Técnicos para Estandarizar los procesos relacionados con PRESAS DE RELAVES. Bogotá.

Ministerio de Minería de Chile - MinMinería. (2019). Bases para una política nacional de depósitos de relaves.

Ministerio del Ambiente. (s.f.). Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Ecuador. Obtenido de http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/es/content/bosques-protectores

Molina, A., Govers, G., Vanacker, V., Poesen, J., Zeelmaekers, E., & Cisneros, F. (2007). Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use. Catena, 71(2), 357-370.



Mora, S; & Vahrson, W-G. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. Bulletin of the Association of Engineering Geologists. Vol. XXXI, No. 1, pp. 49-58.

Moran, R. E. (2011) Ada Tepe Gold Deposit EIS, Krumovgrad, Bulgaria: Technical Comments.

Morril, J., Chambers, D., Emerman, S., Harkinson, R., Kneen, J., Lapointe, U., . . . Turgeon, R. (2022). Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management . Earthworks, MiningWatch Canada, London Mining Network.

Neuman, S. P. (1994). Generalized scaling of permeabilities: Validation and effect of support scale. Geophysical research letters, 21(5), 349-352.

Nonner, J. C., & Nonner, J. (2002). Introduction to Hydrogeology: Unesco-IHE Delft Lecture Note Series. CRC Press

Nordstrom D.K. (2011) Sulfide Mineral Oxidation. In: Reitner J., Thiel V. (eds) Encyclopedia of Geobiology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht

Núñez, J., Pizarro, S., Gutiérrez, M. & J. Ñaupari (2021). Dinámica espacio temporal de la biomasa aérea en pastizales altoandinos basado en NDVI-MODIS validado por espectrometría in situ. Rev Inv Vet Perú 2021; 32(3).

Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías para la calidad del agua potable. OMS, Ginebra.

Orr, T. (2012). Codes and standards and their relevance. En ICE Manual of Geotechnical Engineering, Capítulo 10, pp 105-124.

Ortiz, D. (2003). Los páramos dentro del contexto ecuatoriano. Los páramos del mundo. Proyecto atlas mundial de los páramos (Hofstede R., Segarra P., Mena P., eds). Global Peatland Initiative/NC-UICN/EcoCiencia, Quito, Ecuador.

Ospina Correa, J.; Osorno Bedoya, L.; Giraldo Builes, J.; Mejía Restrepo, E.; & Marquez Godoy, M. (2011). Aplicaciones biotecnológicas en minería aurífera: Estado del arte sobre la oxidación bacteriana de arsenopirita (FeAsS). Informador Técnico (Colombia) Edición 75, Enero - Diciembre 2011, pág. 53 - 65

Paikaray, S (2014). Arsenic Geochemistry of Acid Mine Drainage. Mine Water Environ Vol. 34:181–196

Peña-Torres, A; Cano-Rodríguez, I; Aguilera-Alvarado, A; Gamino-Arroyo, Z; Gómez-Castro, F; Gutiérrez-Valtierra, M & Soriano-Pérez, S (2012). Adsorción y desorción de arsénico en oxihidróxidos de fierro sintéticos como modelo de estudio para explicar uno de los mecanismos de su lixiviación de jales mineros. Revista Mexicana de Ingeniería Química. Vol. 11, No. 3 (2012) 495-503

Pérez Guartambel, C. (2012). Agua u Oro. Kimsakocha, la resistencia por el agua.

Pesantez-Parra (2017). Identificación del impacto producido por la minería en Quimsacocha en la recarga de aguas superficiales y subterráneas a través de un estudio hidrogeológico. Tesis de grado. Universidad de Cuenca.

Piña, A., Donado, L. D., & Blessent, D. (2019). Analysis of the scale-dependence of the hydraulic conductivity in complex fractured media. Journal of Hydrology, 569, 556-572.



Quesada y Quizhpi.,2020 Análisis comparativo de la influencia del caudal base de las subcuencas de los ríos Machángara, Tarqui y Yanuncay en el caudal base del río Paute durante el periodo de estiaje de los años 2009 a 2011.

Railsback, B. (2012). Some Fundamentals of Mineralogy and Geochemistry. Department of Geology, University of Georgia, Athens, Georgia 30602-2501 U.S.A

Relaves. (2015). Resumen: Informes de lodos y aguas residuales Región Atacama. Análisis preliminar situación Post - Aluvión III Región Atacama

Rimstidt J, Chermak J, & Gagen P. (1993). Rates of Reaction of Galena, Sphalerite, Chalcopyrite, and Arsenopyrite with Fe(III) in Acidic Solutions. En Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation.

Robertson , S., & Kirsten, I. (1989). Draft acid rock drainage technical guide Vol. 1. Vancouver.

Rodríguez, C.E. (2001). Hazard assessment of earthquake-induced landslides on natural slopes. Tesis de doctorado. Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London

Rodríguez, C.E., Bommer, J.J., & Chandler, R.J. (1999). Earthquake-induced landslides: 1980–1997.

Rodríguez, R., & Oldecop, L. (2011). Humedad y estabilidad geotécnica de presas de relaves. Aspectos relacionados a la hidrogeología e hidroquímica en zonas mineras del sur del Ecuador. Quito., (pág. 45). Quito.

Rovey, C. W., & Cherkauer, D. S. (1995). Scale dependency of hydraulic conductivity measurements. Groundwater, 33(5), 769-780.

Ruiz Jaramillo, L. (2017). Implementación de un modelo de calidad de agua aplicable a la simulación de metales pesados en corrientes con caso de estudio en la cuenca del río Negro. Tesis de Maestría en Ingeniería ambiental. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

SCT (2016). Manual de diseño y construcción de túneles de carretera. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Tècnicos. Estados Unidos Mexicanos

Senagua – Empresa Pública ESPOL TECH. Mapa hidrogeológico de Ecuador. Escala 1: 1´000.000

SERNAGEOMIN. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. Santiago de Chile.

SERNAGEOMIN. (2018). Estudios de normativas internacionales de diseño, construcción, operación, cierre y post cierre de dépositos de relaves. Santiago de Chile.

SGM (2017). Escalas de sismos. Servicio Geológico Mexicano. Consulta en línea: https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/Escalas-sismos.html

Shahbazi, A., Saeidi, A., & Chesnaux, R. (2020). A review of existing methods used to evaluate the hydraulic conductivity of a fractured rock mass. Engineering Geology, 265, 105438

Singhal & Gupta (2010). Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer

Smith, L. (2021) Hydrogeology and Mineral Resource Development. Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2021.



Suescún Casallas, Luis Camilo, «Modelación analítica y numérica para predicción y calibración de caudales de

infiltración en obras subteráneas,» Bogotá DC Colombia, 2016.

Torres, N., 2015. La declaratoria del macizo del cajas como reserva de la biosfera y la minería a gran escala. Posibilidades y contradicciones en el caso de Quimsacocha, Flacso, Quito.

Torres Romero, S. F. y Proaño Santos, C. O. 2018. Componentes del balance hídrico en los páramos de jatunsacha, Ecuador. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 28(2):52-66.

Towhata, I. (2008). Geotechnical Earthquake Engineering. Springer. Verlag Berlin Heidelberg

U.S. Army Corps of Engineers. (1997). Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering. Technical Letter No. 1110-2-547

Vaughan, D. (2006). Arsenic. En Elements Vol. 2 No. 2.

Vaskou, P, Quadros, E., Kanji, M., Johnson, T. & M. Ekmekci (2019) ISRM Suggested Method for the Lugeon Test. Rock Mechanics and Rock Engineering. Springer

Washington State Department of Transportation – WSDOT (2011). Geotechnical Design Manual. Geotechnical services.

Wels, C., Mackie, D., & Scibek, J. (2012). Guidelines for groundwater modelling to assess impacts of proposed natural resource development activities. Ministry of Environment, Water Protection & Sustainability Branch.

Woessner, W (2020) Groundwater – Surface Water Exchange. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2020.

Xhen, Z., Wei, Y., Xu, K., & An, H. (2016). Risk assessment of tailings dam break due to overtopping. EJGE, 21(07), 1641-1649.

Yoshimi, Y., Yanaka, K., & Tokimatsu, H. (1989). Liquefaction resistance of a partially saturated sand. Soils and foundations 29(3). 157-162.

Zhao, Huarong; Beicheng, XIa; Jianqiao, Qin; Zhang, Jiaying. (2011). Hydrogeochemical and mineralogical characteristics related to heavy metal attenuation in a stream polluted by acid mine drainage: A case study in Dabaoshan Mine, China. Journal of Environmental Sciences, págs. 979 – 989.